

**PENGARUH *FEED RATE* PADA PROSES *SLOT MILLING* DENGAN
METODE *MINIMUM QUANTITY LUBRICATION* TERHADAP
KEKASARAN PERMUKAAN ALUMINIUM A6061**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



ACHMAD FAUZI PRADITYA
NIM. 145060201111055

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018

LEMBAR PENGESAHAN
**PENGARUH *FEED RATE* PADA PROSES *SLOT MILLING* DENGAN
METODE *MINIMUM QUANTITY LUBRICATION* TERHADAP
KEKASARAN PERMUKAAN ALUMINIUM A6061**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



ACHMAD FAUZI PRADITYA
NIM. 145060201111055

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 18 Juli 2018

DOSEN PEMBIMBING I

Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief, MT.
NIP 19591128 198710 1 001

DOSEN PEMBIMBING II

Fikrul Akbar Alamsyah, ST., MT.
NIK 201605 860703 1 001

Mengetahui,
KETUA PROGRAM STUDI S1



Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP 19740930 200012 1 001

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 18 Juli 2018
Mahasiswa,



Achmad Fauzi Praditya
NIM. 145060201111055

JUDUL SKRIPSI:

**PENGARUH FEED RATE PADA PROSES SLOT MILLING DENGAN METODE
MINIMUM QUANTITY LUBRICATION TERHADAP KEKASARAN PERMUKAAN
ALUMINIUM A6061**

Nama Mahasiswa : Achmad Fauzi Praditya
NIM : 145060201111055
Program Studi : Teknik Mesin
Minat : Teknik Produksi

KOMISI PEMBIMBING

Pembimbing I : Dr. Ir. Achmad As'ad Sonif, MT.
Pembimbing II : Fikrul Akbar Alamsyah, ST., MT.

TIM DOSEN PENGUJI

Ketua : Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M. Eng.
Sekretaris : Teguh Dwi, ST., M. Eng., Ph.D.
Anggota : Moch. Syamsul Ma'arif, ST., MT.

Tanggal Ujian : 4 Juli 2018
SK Penguji : 1334/UN10.F07/SK/2018

KATA PENGANTAR

Pertama dan yang utama, tidak lupa penulis panjatkan puji syukur atas kehadiran Allah SWT, yang dengan ridho, rezeki, rahmat, nikmat serta hidayah-Nya lah penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **Pengaruh *Feed Rate* pada Proses *Slot Milling* dengan Metode *Minimum Quantity Lubrication* Terhadap Kekasaran Permukaan Aluminium A6061**, yang menjadi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.

Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini, yaitu:

1. Mama dan Papa tercinta yang mengarahkan segalanya, baik doa, dukungan moril maupun materil sejak pertama menapakkan kaki di perantauan.
2. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi, MT., P.hD selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Bapak Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng., P.hD. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, yang bersama dengan bapak Ketua Jurusan sudah memberikan fasilitas bagi penulis dalam melaksanakan tugas akhir ini.
4. Bapak Ir. Achmad As'ad Sonief, MT. Sebagai Dosen Pembimbing I yang sudah mau meluangkan waktu, membagikan ilmu, mengarahkan serta memberikan motivasi kepada penulis selama proses penyusunan tugas akhir ini.
5. Bapak Fikrul Akbar Alamsyah, ST., MT. Sebagai Dosen Pembimbing II yang turut memberikan saran, mengarahkan, berbagi ilmu, dan meluangkan waktu nya kepada penulis selama proses penyusunan tugas akhir ini.
6. Bapak Purnami, ST., MT. Sebagai Dosen Penasehat Akademik
7. Bapak Kasmanu, ST. sebagai Laboran Lab. Proses Manufaktur 1
8. Komeng dan Raka, teman satu kelompok tugas akhir atas dukungan dan semangat selama proses penyusunan tugas akhir.
9. Mas-mas, teman-teman, dan adik-adik kolega asisten Lab. Proses Manufaktur 1, Teknik Mesin Brawijaya.
10. Sendi, Komeng, Raka, Zalbie, Farhan, Ray, Frag, Padang, Adam, Usman, Ira, Mea, dan Putri yang sudah saling bahu-membahu, hingga akhirnya satu persatu meraih gelar Sarjana
11. Novita Rahmasari yang selalu memberi motivasi untuk tidak terhanyut dalam kemalasan dan mengingatkan agar lekas berhenti membebani orang tua
12. Teman-teman MAF14, keluarga seperjuangan dalam lika-liku kehidupan mahasiswa.
13. Rekan-rekan asisten Lab. Otomasi Manufaktur dan Lab. Metrologi Industri, Teknik Mesin, Brawijaya yang telah membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
14. Dan pihak-pihak lainnya yang turut membantu menyelesaikan tugas akhir yang belum disebut dan tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis sadar bahwa tulisan ini masih jauh dari sempurna, oleh sebab itu penulis mengharapkan masukan dan kritikan membangun untuk menjadi acuan bagi penelitian selanjutnya. Akhir kata, penulis ucapkan terima kasih.

Malang, Juni 2018

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	viii
RINGKASAN.....	ix
SUMMARY	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	3
2.2 Proses Manufaktur	3
2.3 Proses Permesinan	4
2.4 Mesin <i>Milling</i>	5
2.4.1 Macam-macam Proses <i>Milling</i>	5
2.4.2 Parameter Pemotongan pada Proses <i>Milling</i>	7
2.4.3 Arah Pemakanan pada Proses <i>Milling</i>	10
2.4.4 Mesin <i>Milling</i> CNC	12
2.5 Material Benda Kerja.....	13
2.6 Kekasaran Permukaan	13
2.7 Getaran pada Proses <i>Milling</i>	17
2.8 Teori Ernst dan Merchant	18
2.9 MQL (<i>Minimum Quantity Lubrication</i>).....	21
2.10 Kerangka Pemikiran	21
2.11 Hipotesis	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1 Metodologi Penelitian.....	22
3.2 Tempat dan Waktu Pelaksanaan	22
3.3 Variabel Penelitian.....	22
3.4 Skema Penelitian	23
3.5 Spesifikasi Alat dan Bahan	25
3.5.1 Alat Penelitian	25
3.5.2 Bahan Penelitian	30
3.6 Dimensi Benda Kerja.....	32
3.7 Prosedur Penelitian	32
3.8 Diagram Alir Penelitian	34

3.9	Rencana Penelitian.....	35
3.9.1	Analisis Data.....	35
3.9.1	Analisis Grafik.....	36

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Data Hasil Penelitian	37
4.2	Analisis Data dengan Metode Reresi Linier	38
4.2.1	Analisis Data Regresi Linier Pengaruh <i>Feed Rate</i> Terhadap <i>Surface Rooughness</i> (Ra) pada Pemakanan Kering (<i>Dry</i>)	39
4.2.2	Analisis Data Regresi Linier Pengaruh <i>Feed Rate</i> Terhadap <i>Surface Rooughness</i> (Ra) pada Pemakanan <i>Minimum Quantity Lubrication</i> (MQL)	40
4.3	Uji T	40
4.3.1	<i>Feed Rate</i> 25 mm/min	41
4.3.2	<i>Feed Rate</i> 50 mm/min	41
4.3.3	<i>Feed Rate</i> 75 mm/min	41
4.4	Grafik dan Pembahasan	43
4.4.1	Analisis Grafik dan Pembahasan Pengaruh <i>Minimum Quantity Lubrication</i> dan Variasi <i>Feed Rate</i> Terhadap <i>Surface Roughness</i> (Ra)..	43
4.4.2	Analisis Grafik dan Pembahasan Amplitudo <i>Displacement</i> Terhadap Proses <i>Slot Milling</i> Pemakanan Kering (<i>Dry</i>) dan <i>Minimum Quantity lubrication</i>	44

BAB V PENUTUP

5.1	Kesimpulan	57
5.2	Saran	57

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Angka Kekasaran (ISO <i>Roughness Number</i>) dan Panjang Sampel Standar ..	17
Tabel 3.1	Kandungan Aluminium A6061	32
Tabel 3.2	Rancangan Pengambilan Data.....	35
Tabel 4.1	Data Hasil Penelitian	37
Tabel 4.2	Data Korelasi pada hasil uji regresi linier pemakanan kering (<i>dry</i>).....	39
Tabel 4.3	Data Regresi Linear Pemakanan Kering (Determinasi)	39
Tabel 4.4	Data Korelasi pada hasil pemakanan MQL.....	40
Tabel 4.5	Data Regresi Linear Pemakanan MQL (Determinasi)	40
Tabel 4.6	Data Uji T dengan <i>Feed Rate</i> 25mm/min.....	41
Tabel 4.7	Data Uji T dengan <i>Feed Rate</i> 50mm/min.....	41
Tabel 4.8	Data Uji T dengan <i>Feed Rate</i> 75mm/min.....	42
Tabel 4.9	Rentang Waktu Pengambilan Data <i>Amplitude Displacement</i> , dan Kekasaran permukaan (Ra) Pemakanan Kering (<i>dry</i>) dengan <i>Feed Rate</i> 25 mm/min	48
Tabel 4.10	Rentang Waktu Pengambilan Data <i>Amplitude Displacement</i> , dan Kekasaran permukaan (Ra) Pemakanan MQL dengan <i>Feed Rate</i> 25 mm/min	48
Tabel 4.11	Rentang Waktu Pengambilan Data <i>Amplitude Displacement</i> , dan Kekasaran permukaan (Ra) Pemakanan Kering (<i>dry</i>) dengan <i>Feed Rate</i> 50 mm/min	51
Tabel 4.12	Rentang Waktu Pengambilan Data <i>Amplitude Displacement</i> , dan Kekasaran permukaan (Ra) Pemakanan MQL dengan <i>Feed Rate</i> 50 mm/min	51
Tabel 4.13	Rentang Waktu Pengambilan Data <i>Amplitude Displacement</i> , dan Kekasaran permukaan (Ra) Pemakanan Kering (<i>dry</i>) dengan <i>Feed Rate</i> 75 mm/min	55
Tabel 4.14	Rentang Waktu Pengambilan Data <i>Amplitude Displacement</i> , dan Kekasaran permukaan (Ra) Pemakanan MQL dengan <i>Feed Rate</i> 75 mm/min	55

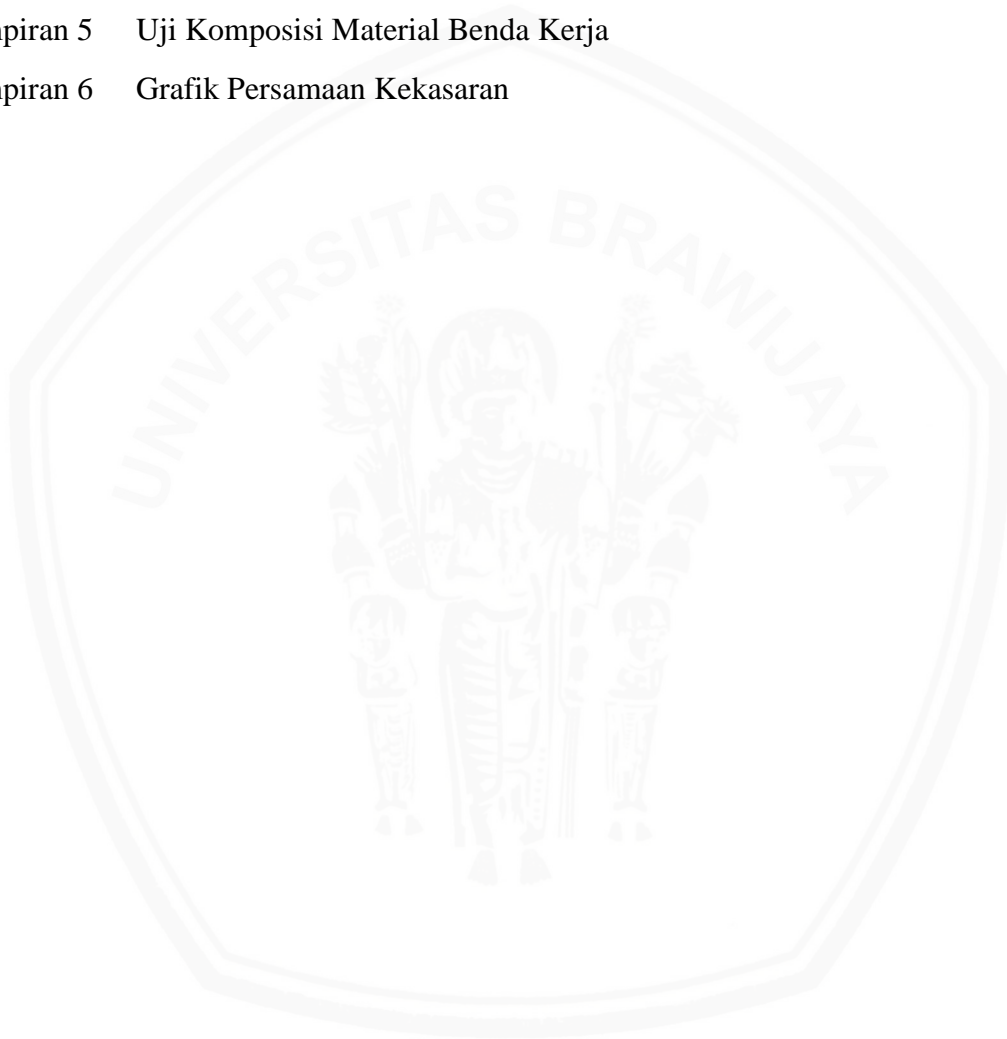
DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Dua Cara Mendefinisikan Proses Manufaktur; a) <i>Technical Process</i> dan b) <i>Economic Process</i>	5
Gambar 2.2	Proses <i>cutting</i>	6
Gambar 2.3	Macam-macam <i>peripheral milling</i>	7
Gambar 2.4	Macam-macam proses <i>face milling</i>	8
Gambar 2.5	pengaruh dari diameter pahat yang berbeda terhadap kecepatan pemotongan	9
Gambar 2.6	Ilustrasi <i>feed per tooth</i> pada proses <i>milling</i>	10
Gambar 2.7	<i>Axial depth of cut</i> (a_p) dan <i>radial depth of cut</i>	10
Gambar 2.8	Ketebalan <i>chip</i> untuk beberapa sudut rotasi	11
Gambar 2.9	<i>Conventional Milling</i>	12
Gambar 2.10	<i>Down Milling</i> atau <i>Climb Milling</i>	13
Gambar 2.11	Mesin <i>Milling</i> Denford <i>Micromill</i> EO1037	14
Gambar 2.12	Sistem Persumbuan Mesin <i>Milling</i>	14
Gambar 2.13	Profil Kekasaran Permukaan	15
Gambar 2.14	Ciri-ciri benda kerja hasil <i>milling</i> yang mengalami <i>chatter vibration</i>	20
Gambar 2.15	(a) gaya yang bekerja pada area pemotongan dalam dua dimensi (b) Lingkaran gaya untuk menjelaskan gaya yang terjadi di zona pemotongan	20
Gambar 2.16		
Gambar 2.17	Alur Kerangka Berpikir	23
Gambar 3.1	Skema Penelitian	25
Gambar 3.2	Denford <i>Micromill</i> EO1037	26
Gambar 3.3	<i>Surface Roughness Tester</i> SJ-301	27
Gambar 3.4	<i>ML Mist Coolant Sprayer</i>	28
Gambar 3.5	Kompresor Udara Krisbow 1HP <i>Direct Driven</i>	29
Gambar 3.6	<i>Height Gauge</i>	30
Gambar 3.7	<i>End-mill cutter</i>	30
Gambar 3.8	<i>Vibration Meter</i>	31
Gambar 3.9	Aluminium A6061	32
Gambar 3.10	<i>Cutting Fluid Tap Matic Aluminium</i>	33
Gambar 3.11	Dimensi Benda Kerja	34
Gambar 3.12	Rencana Grafik Amplitudo	38
Gambar 4.1	Grafik hasil analisis regresi pengaruh variabel <i>Feed Rate</i> dan <i>minimum quantity lubrication</i> terhadap <i>surface roughness</i> (R_a)n dalam logaritma .	43
Gambar 4.2	Data Keseluruhan <i>Amplitude Displacement</i> pada Proses <i>Slot-milling</i> dengan <i>Feed Rate</i> 25 mm/min	45
Gambar 4.3	Data sepanjang 1,25 mm <i>Amplitude Displacement</i> pada proses <i>Slot-Milling</i> dengan <i>Feed Rate</i> 25mm/min tanpa dan dengan Pengaplikasian MQL....	45
Gambar 4.4	Data <i>Spectrum Frequency</i> pada Proses <i>Slot-milling</i> dengan <i>Feed Rate</i> 25mm/min tanpa dan dengan pengaplikasian MQL pada t 45.2 detik	46
Gambar 4.5	Data Kekasaran Permukaan dengan <i>Feed Rate</i> 25 mm/min pada Proses <i>Slot-milling</i> pemakanan kering (<i>dry</i>) sepanjang t = 43,8 – 48,7 detik	46

Gambar 4.6	Data Kekasaran Permukaan dengan <i>Feed Rate</i> 25 mm/min pada Proses <i>Slot-milling</i> pemakanan dengan <i>minimum quantity lubrication</i> (MQL) sepanjang $t = 43,8 - 48,7$ detik.....	47
Gambar 4.7	Data Keseluruhan <i>Amplitude Displacement</i> pada Proses <i>Slot-milling</i> dengan <i>Feed Rate</i> 50 mm/min	49
Gambar 4.8	Data sepanjang 1,25 mm <i>Amplitude Displacement</i> pada proses <i>Slot-Milling</i> dengan <i>Feed Rate</i> 50mm/min tanpa dan dengan Pengaplikasian MQL....	49
Gambar 4.9	Data <i>Spectrum Frequency</i> pada Proses <i>Slot-milling</i> dengan <i>Feed Rate</i> 50mm/min tanpa dan dengan pengaplikasian MQL pada $t = 12,2$ detik	49
Gambar 4.10	Data Kekasaran Permukaan dengan <i>Feed Rate</i> 50 mm/min pada Proses <i>Slot-milling</i> pemakanan kering (<i>dry</i>) sepanjang $t = 11,5 - 13,9$ detik	50
Gambar 4.11	Data Kekasaran Permukaan dengan <i>Feed Rate</i> 50 mm/min pada Proses <i>Slot-milling</i> pemakanan dengan <i>minimum quantity lubrication</i> (MQL) sepanjang $t = 11,5 - 13,9$ detik.....	50
Gambar 4.12	Data Keseluruhan <i>Amplitude Displacement</i> pada Proses <i>Slot-milling</i> dengan <i>Feed Rate</i> 75 mm/min	52
Gambar 4.13	Data sepanjang 1,25 mm <i>Amplitude Displacement</i> pada proses <i>Slot-Milling</i> dengan <i>Feed Rate</i> 75mm/min tanpa dan dengan Pengaplikasian MQL....	52
Gambar 4.14	Data <i>Spectrum Frequency</i> pada Proses <i>Slot-milling</i> dengan <i>Feed Rate</i> 75mm/min tanpa dan dengan pengaplikasian MQL pada $t = 12,1$ detik	53
Gambar 4.15	Data Kekasaran Permukaan dengan <i>Feed Rate</i> 75 mm/min pada Proses <i>Slot-milling</i> pemakanan kering (<i>dry</i>) sepanjang $t = 11,7 - 12,6$ detik	53
Gambar 4.11	Data Kekasaran Permukaan dengan <i>Feed Rate</i> 75 mm/min pada Proses <i>Slot-milling</i> pemakanan dengan <i>minimum quantity lubrication</i> (MQL) sepanjang $t = 11,7 - 12,1$ detik.....	54

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Gradik Proses <i>Slot Milling Dry</i> dan MQL dengan <i>Feed Rate</i> 25mm/min
Lampiran 2	Gradik Proses <i>Slot Milling Dry</i> dan MQL dengan <i>Feed Rate</i> 50mm/min
Lampiran 3	Gradik Proses <i>Slot Milling Dry</i> dan MQL dengan <i>Feed Rate</i> 75mm/min
Lampiran 4	Tampilan Software Labview 2013
Lampiran 5	Uji Komposisi Material Benda Kerja
Lampiran 6	Grafik Persamaan Kekasaran



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses manufaktur di definisikan sebagai proses yang mengubah bahan mentah menjadi barang setengah jadi ataupun barang jadi. Dengan berkembangnya dunia industri, maka proses manufaktur terus berkembang terutama pada proses permesinan logam. Seiring perkembangan permesinan logam, maka muncul mesin berbasis *numerical control* atau lebih dikenal dengan CNC (*Computer Numericaly Controled*). Salah satu jenis mesin CNC yang umum digunakan adalah mesin *milling* atau *frais* karena kemampuannya untuk melakukan berbagai jenis pekerjaan menggunakan satu mesin. Karena perkembangan dunia industri, mesin *milling* mulai digunakan untuk membuat benda-benda sangat kecil dengan ukuran mikron salah satunya alat-alat medis hingga muncul akan kebutuhan mesin *micro milling*. Kegunaan dari mesin *micro milling* diantaranya adalah pembuatan alat-alat dibidang kesehatan yang membutuhkan tingkat presisi tinggi.

Perbedaan penggunaan mesin *micro-milling* dan *milling* konvensional hanya terletak pada skalanya (Uriarte et al., 2007). *Micro-milling* digunakan untuk membuat miniatur benda atau benda yang ukurannya dirubah menjadi sangat kecil. Sehingga ukuran pahat yang digunakan juga sangat kecil, berkisar antara 1 hingga 1000 mikrometer. Hal ini menyebabkan kekuatan *flexural rigidity* pahat rendah sehingga tidak mampu menahan *chip load* yang besar. Untuk mengatasi hal ini, digunakan *spindle speed* tinggi sehingga dapat mereduksi *chip load* pada pahat (Kunda Kr., 2014)

Salah satu proses yang bisa dilakukan dengan mesin *micro-milling* adalah *slot micromilling*. *Slot micromilling* adalah proses pemakanan dimana sumbu putar pahat *perpendicular* terhadap permukaan benda kerja dan hasil dari permesinannya adalah kantong (*slot*).

Banyaknya penggunaan mesin *micromilling* pada dunia industri bukan berarti tidak memiliki hambatan. Salah satu hambatan yang muncul getaran pada pahat yang disebut *chatter*. Karena *chatter* yang berdampak pada penurunan kualitas permukaan produk, maka *chatter* harus diminimalisir dengan menggunakan magnet permanen yang terpasang dekat *spindle*. Amplitudo *chatter* dapat di kurangi oleh medan magnet, sehingga kualitas permukaan meningkat. (Sulaiman et. al., 2012)

Dari macam-macam mesin *micromill*, terdapat mesin yang di desain untuk melakukan *dry-cutting process*. Sementara, menurut (Vazquez et al., 2014) kekasaran permukaan pada proses *dry-cutting* lebih tinggi 20% jika dibandingkan dengan proses permesinan menggunakan MQL (*Minimum Quantity Lubricant*).

Nilai kekasaran permukaan suatu produk akan tinggi ketika proses permesinan yang dilakukan tidak baik. Dan faktor-faktor yang mempengaruhi proses permesinan adalah *cutting parameters, tool, machine tool, cutting fluid dan workpiece* (Muller, 2012). Salah satu contoh pengaruh *cutting parameter* adalah semakin tinggi *cutting speed* akan berakibat menurunnya tingkat kekasaran (Sultan, 2015).

Berdasarkan uraian yang di jabarkan diatas, kekasaran permukaan perlu diteliti karena sangat berpengaruh terhadap kualitas produk suatu proses permesinan. Untuk itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh *Lubrikasi pada proses micro face-milling*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan dari uraian latar belakang tersebut, maka rumusan masalah dari peneitian ini adalah bagaimana pengaruh penggunaan *Minimum Quantity Lubrication* pada proses *slot milling* dengan variasi *feed rate* terhadap kekasaran permukaan.

1.3 Batasan Masalah

Untuk membuat penelitian ini tetap terarah dan menghindari meluasnya masalah, maka batasan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Mesin *Micro Milling* yang digunakan dalam keadaan baik.
2. *End Milling Tool* yang dipakai dalam keadaan baik.
3. Kualitas hasil *Micro Milling* dianggap seragam.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian adalah meneliti bagaimana dampak dari kondisi lubrikasi minimum terhadap kekasaran permukaan hasil proses *micro milling*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

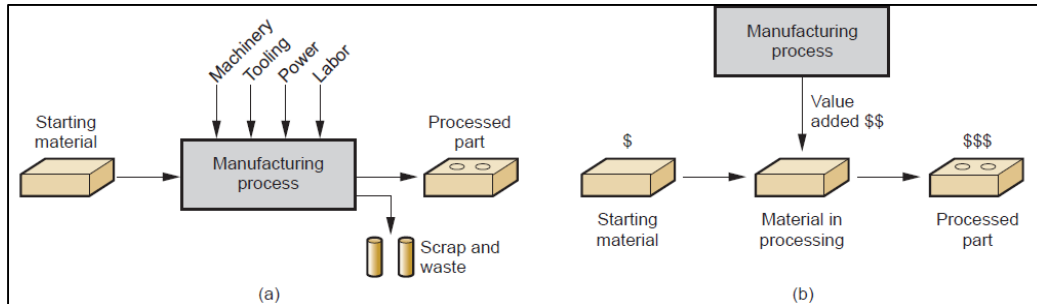
Okokpujie (2015) melakukan penelitian tentang pengaruh parameter pemesinan *end mill* terhadap kekasaran permukaan. Penelitian itu menghasilkan seiring dengan meningkatnya *feed rate*, akan diikuti oleh meningkatnya kekasaran permukaan. Hal ini terjadi karena dengan meningkatnya *feed rate*, *chips* berubah menjadi kontinyu dan mulai menempel pada permukaan pahat sehingga menghasilkan goresan yang meningkatkan kekasaran permukaan.

Kuttolamadom (2010) melakukan penelitian mengenai pengaruh parameter permesinan terhadap kekasaran permukaan Aluminium A6061. Penelitian tersebut menyimpulkan semakin besar *feed motion*, maka kekasaran permukaan turut meningkat. Hal ini disebabkan semakin besar *feed motion* maka getaran yang timbul akan semakin besar dan berakibat pada permukaan benda kerja yang kurang baik.

Okonkwo (2015) melakukan penelitian tentang pengaruh parameter permesinan pada kondisi MQL terhadap kekasaran permukaan menggunakan model matematika pada aluminium. Penelitian ini menghasilkan bahwa pada kondisi MQL, seiring dengan naiknya *feed rate* maka kekasaran permukaannya juga akan naik.

Chineye (2014) melakukan penelitian tentang pengaruh parameter permesinan terhadap kekasaran permukaan aluminium 6061 pada kondisi tanpa pelumasan. Penelitian ini menghasilkan dengan naiknya *feed rate* maka kekasaran permukaan akan meningkat yang disebabkan oleh getaran dan panas yang muncul pada pahat.

2.2 Proses Manufaktur



Gambar 2.1 Dua Cara Mendefinisikan Proses Manufaktur a) *Technical Process* dan b) *Economic Process*

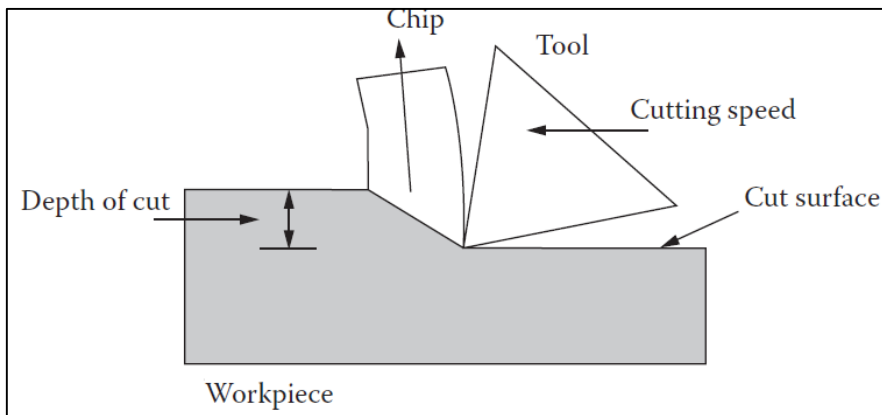
Sumber : Groover (2012, p.4)

Proses manufaktur dapat didefinisikan dari dua perspektif. Yang pertama dari perspektif teknologi dimana manufaktur diartikan sebagai proses penerapan proses fisika ataupun kimia untuk mengubah sifat, penampilan ataupun geometri dari bahan mentah menjadi komponen ataupun produk jadi. Dimana penggabungan komponen-komponen yang ada juga merupakan sebuah proses manufaktur. Dari perspektif ekonomi, proses manufaktur adalah peningkatan nilai jual material dengan cara merubah ukuran atau *properties*-nya dan juga menggabungkan dengan komponen lainnya sehingga meningkat nilainya. (Groover, 2012)

2.3 Proses Permesinan

Proses permesinan atau *machining process* adalah usaha mencapai bentuk, ukuran dan kualitas permukaan benda kerja yang sesuai dengan cara menghilangkan bagian yang tidak diinginkan (*machining allowance*). Proses permesinan dibutuhkan oleh sebagian besar produk hasil manufaktur sebagai salah satu tahap dalam proses manufakturnya. (El-Hofy, 2014).

Salah satu bagian dari proses *machining* adalah proses *cutting*. Selama proses *cutting*, pahat merambah ke dalam benda kerja sejauh *depth of cut* untuk melakukan *material removal*. Proses *turning* (bubut), *milling* (frais), *drilling*, dan *boring* termasuk ke dalam proses *cutting*.



Gambar 2.2 Proses *cutting*
Sumber : Youssef (2014, p.5)

2.4 Mesin *Milling*

Mesin *milling* adalah mesin perkakas yang menggunakan pahat potong dengan banyak sudut potong yang berputar untuk melakukan pemotongan pada bagian tertentu benda kerja. Mesin *milling* atau freis memiliki keunggulan lebih fleksibel jika dibandingkan dengan mesin perkakas lain seperti mesin bor dan mesin bubut karena mesin *milling* dapat melakukan pemakanan dari segala arah. (Davim, 2011)

Berdasarkan putaran *spindle* utamanya mesin *milling* dapat dibagi menjadi 3 jenis antara lain :

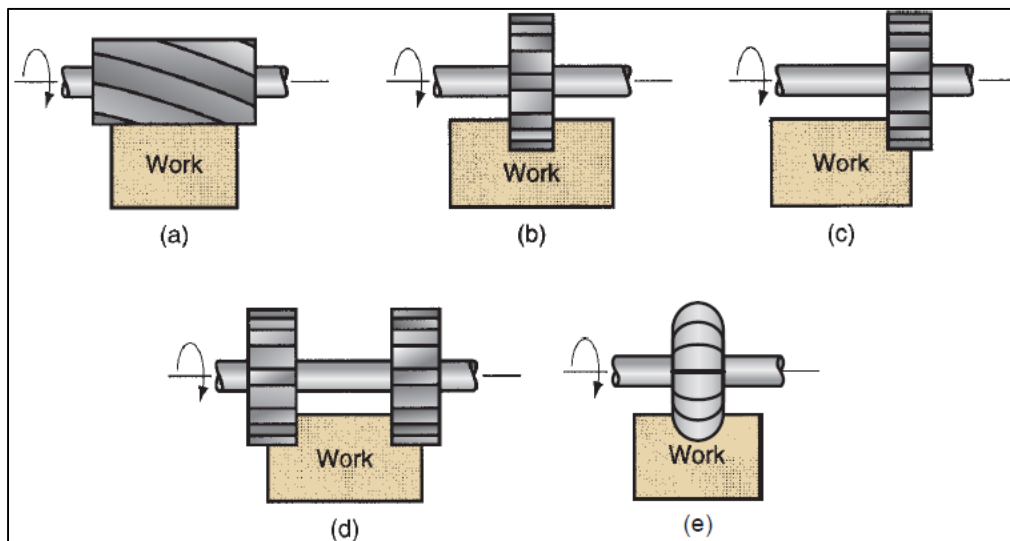
1. Mesin *milling universal*
2. Mesin *milling vertical*
3. Mesin *milling horisontal*

2.4.1 Macam-Macam Proses *Milling*

Pada prinsipnya, proses *milling* dapat dibagi menjadi dua macam, yaitu :

1. *Peripheral Milling*

Pada *peripheral milling* atau disebut juga *plain milling*, sumbu putar dari pahat ada pada posisi sejajar dengan *workpiece*. Mata pahat dari *peripheral milling* berada pada permukaan pahat yang berbentuk silindris. Proses *peripheral milling* dibagi menjadi *slab milling*, *side miling*, *form milling*, *straddle milling* dan *slot milling*.



Gambar 2.3 Macam-macam *peripheral milling* : (a) *slab milling*, (b) *slot milling*, (c) *side milling*, (d) *straddle milling*, dan (e) *form milling*.

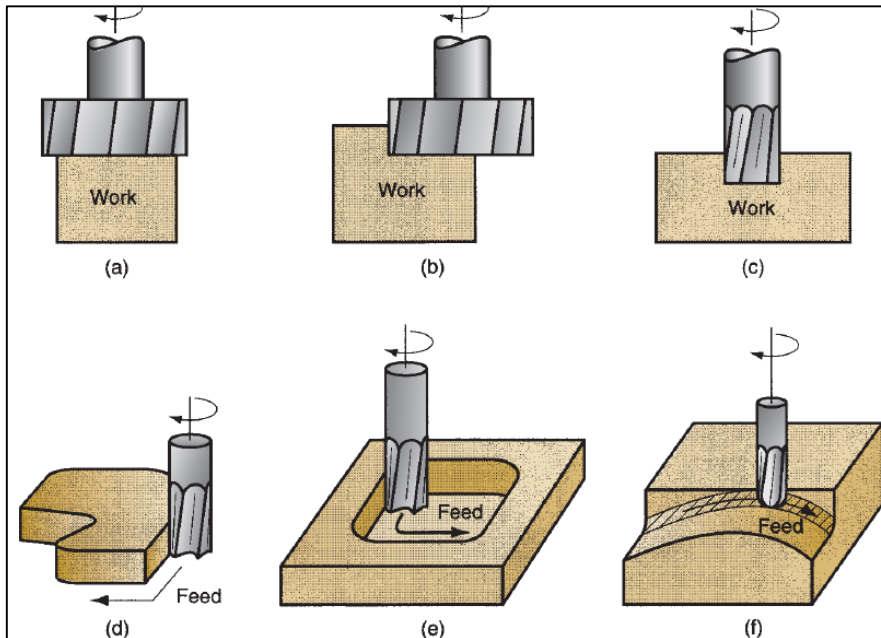
Sumber : Groover (2012, p.567)

2. Face Milling

Pada *face milling*, sumbu putar pahat diposisikan tegak lurus dengan *workpiece*. Bagian tajam dari pahat *face mill* umumnya ada dibagian tepi dan terletak pada bagian ujung pahat. *Face Milling* dapat dibagi menjadi beberapa jenis seperti:

- Conventional face milling*, adalah proses dimana diameter pahat potong lebih besar daripada *workpiece*, sehingga kedua sisi ujung pahat menggantung di luar *workpiece*.
- Partial face milling*, adalah proses dimana sebagian pahat menggantung di luar *workpiece*.
- Slot milling*, adalah proses dengan diameter pahat tidak lebih besar dari *workpiece*, sehingga terbentuk celah pada benda kerja
- Profile milling*, merupakan proses *end milling* dimana pahat melakukan *material removal* pada sisi luar benda kerja.
- Pocket milling*, adalah proses *end milling* dimana luar permukaan yang di kurangi tidak lebih luas dari permukaan benda kerja dan tidak menghilangkan sisi paling luar dari benda kerja.

- f. *Surface contouring*, adalah proses pemakanan menggunakan pahat yang permukaannya berbentuk bola guna membentuk lengkungan tanpa sudut pada permukaan *workpiece*.



Gambar 2.4 Macam-macam proses *face milling* : (a) *conventional face milling*, (b) *partial face milling*, (c) *slot milling*, (d) *profile milling*, (e) *pocket milling*, dan (f) *surface contouring*

Sumber : Groover (2012, p.569)

2.4.2 Parameter Pemotongan pada Proses *Milling*

Terdapat beberapa macam parameter pemotongan dasar pada proses *milling*, antara lain :

1. Kecepatan Pemotongan (*Cutting Speed*)

Cutting Speed didefinisikan sebagai kecepatan tangensial salah satu titik pada sisi luar pahat, umumnya memiliki dimensi m/min. Kecepatan pemotongan memiliki hubungan langsung dengan dimensi pahat dan kecepatan *spindle* dengan rumus dibawah ini:

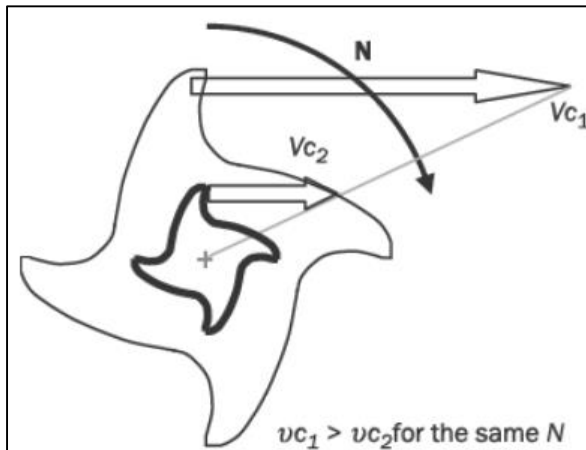
$$v_c = \frac{\pi \cdot N \cdot D}{1000} \dots\dots\dots (2-1)$$

dengan:

v_c = Kecepatan pemotongan (*cutting speed*) (m/min)

N = Kecepatan putar *spindle* (Rev/min)

D = Diameter pahat *milling* (mm)



Gambar 2.5 Ilustrasi pengaruh dari diameter pahat yang berbeda terhadap kecepatan pemotongan

Sumber : Davim (2011, p.223)

2. Feed rate

Feed Rate atau kecepatan pemakanan linear dapat diartikan dengan jarak yang ditempuh pahat pada satuan waktu tertentu. *Feed rate* sangat erat hubungannya dengan *feed per tooth* dimana pengertian *feed per tooth* adalah jarak yang dilalui pahat pada tiap putaran dan dibagi dengan jumlah gigi pahat (*cutting edges*). *Feed per tooth* berhubungan dengan besarnya *chip* yang dibentuk tiap gigi pahat seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.6 sehingga semakin besar nilai *feed per tooth* maka beban pada tiap gigi pahat akan besar.

Hubungan antara kecepatan pemakanan linear dan *feed per tooth* dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$v_f = f_z \cdot Z \cdot N \dots\dots\dots (2-2)$$

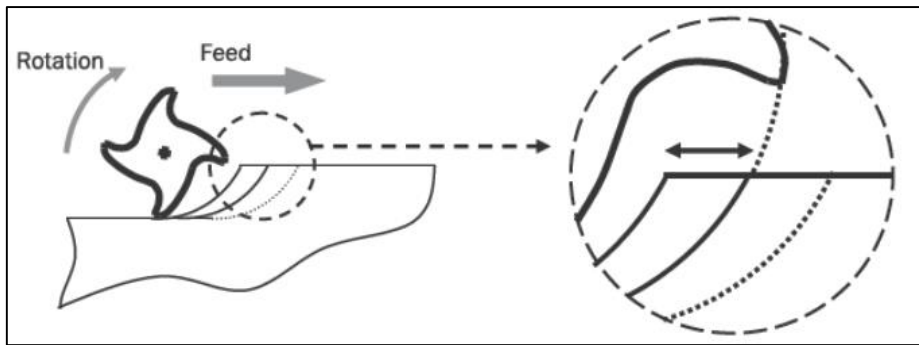
dengan :

v_f = *feed rate* (m/min)

f_z = *feed per tooth* (m)

Z = Jumlah gigi pahat

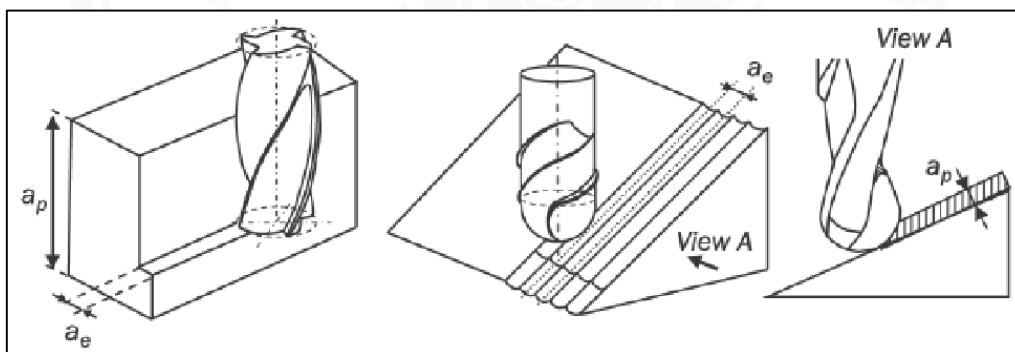
N = *Spindle Speed* (rev/min)



Gambar 2.6 Ilustrasi *feed per tooth* pada proses *milling*
Sumber : Davim (2011, p.223)

3. Kedalaman Pemotongan (*Depth of cut*)

Dalam proses *milling*, terdapat dua jenis kedalaman pemotongan yaitu kedalaman pemotongan *axial* dan kedalaman pemotongan *radial* dimana keduanya diukur dalam milimeter (mm). Kedalaman pemotongan akan berpengaruh terhadap beban yang diterima oleh mata pahat. Jika nilai kedalaman pemotongan semakin besar, maka beban yang diterima oleh mata pahat juga akan meningkat.



Gambar 2.7 Axial depth of cut (a_p) dan radial depth of cut (a_e)
Sumber : Davim (2011, p.225)

4. Ketebalan *Chip*

Ketebalan *chip* saat proses frais dipengaruhi oleh sudut putar dari pahat seperti yang diilustrasikan dalam gambar 2.8. Ketebalan *chip* dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

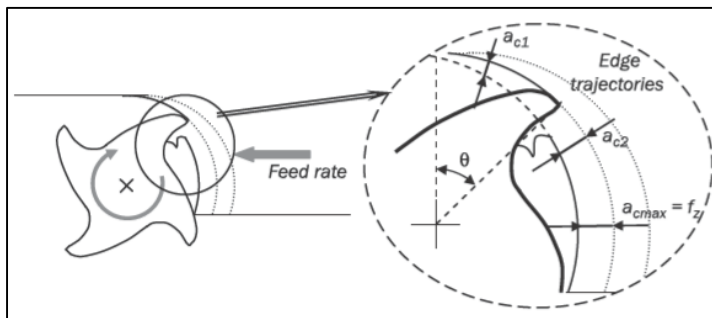
$$a_c = f_z \cdot \sin(\theta) \dots \dots \dots (2-3)$$

dengan :

a_c = ketebalan *chip* (mm)

f_z = *feed per tooth* (mm)

θ = sudut rotasi pahat ($^{\circ}$)



Gambar 2.8 Ketebalan *chip* untuk beberapa sudut rotasi
Sumber : Davim (2011, p.226)

5. Material Removal Rate

Material Removal Rate (RMR) adalah istilah untuk besarnya jumlah material yang hilang dari benda kerja tiap satuan waktu tertentu. Pada umumnya dihubungkan dengan produktivitas dari proses. Pada produksi masal, nilai RMR sebisa mungkin dimaksimalkan. Tetapi pada tahap *finishing*, sebisa mungkin nilai MMR di rendahkan untuk mencapai tingkat presisi dan nilai kekasaran permukaan yang diinginkan dengan menggunakan *feed per tooth* dan kecepatan pemotongan yang rendah.

Untuk mengetahui nilai MRR, dapat menggunakan rumus 2.4 dibawah ini :

$$Q = v_c \cdot A_c \dots \dots \dots (2-4)$$

dengan :

Q = *Material Removal Rate* (mm³/min)

v_c = *cutting speed* (m/min)

A_c = *chip section* (mm²)

Cara mengetahui nilai *chip section* dapat menggunakan persamaan berikut :

$$A_c = h \cdot b \dots\dots\dots (2-5)$$

dengan :

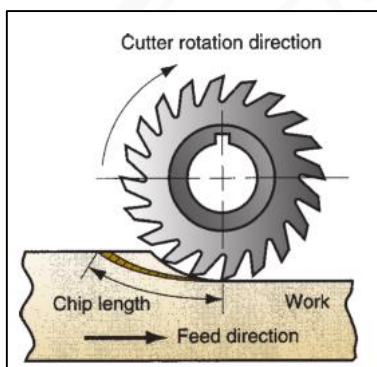
h = ketebalan *chip* (mm)

b = lebar *chip* (biasanya sama dengan *axial depth of cut*) (mm)

2.4.3 Arah Pemakanan Pada Proses *Milling*

Terdapat dua bentuk proses *milling* menurut arah pemakanan terhadap benda kerja, antara lain:

1. *Conventional milling*, adalah proses *milling* dimana arah putaran pahat berlawanan dengan arah gerak dari benda kerja (arah pemakanan).



Gambar 2.9 *Conventional Milling*

Sumber : Groover (2013, p.568)

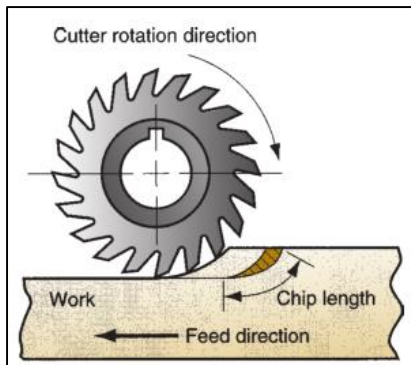
Persamaan di bawah ini dapat digunakan untuk mencari ketebalan *chip* yang terbentuk saat proses *conventional milling*.

$$t_c = f_t \cdot \sin(\Phi + \alpha) \dots\dots\dots (2-6)$$

dengan :

α : *rake angle* ($^{\circ}$)

2. *Climb milling*, adalah proses *milling* horizontal dimana arah putaran dari pahat searah dengan arah gerak dari benda kerja (arah pemakanan).



Gambar 2.10 Down Milling atau Climb Milling
Sumber : Groover (2012, p.568)

Persamaan di bawah ini dapat digunakan untuk mencari ketebalan *chip* yang terbentuk saat proses *climb milling*.

$$t_c = f_t \cdot \sin \Phi \dots\dots\dots (2-7)$$

dengan :

- t_c : tebal *chip* (mm)
 f_t : *feed per tooth* (mm)
 Φ : *cutting effective angle*(°)

Perbedaan mendasar dari *conventional* dan *climb milling* adalah bentuk chip yang terbentuk sebagai hasil dari proses pemakanan. Dimana pada proses *conventional milling* akan menghasilkan chip dengan bentuk memanjang. Sementara pada proses *climb milling* akan menghasilkan chip yang lebih pendek. (Groover, 2012)

2.4.4 Mesin Milling CNC

Mesin *Computer Numerically Control* atau lebih umum dengan sebutan mesin CNC adalah mesin yang dikendalikan oleh komputer dengan bahasa numerik (perintah berupa kode huruf, angka maupun simbol) sesuai standart ISO. Dengan menerapkan teknologi CNC, maka kinerja antara komputer dengan sistem mekanik mesin akan lebih sinkron, sehingga mesin-mesin perkakas CNC akan lebih akurat, teliti dan fleksibel jika dibandingkan dengan mesin perkakas konvensional. Mesin perkakas CNC dapat mengurangi campur tangan dari operator ketika mesin sedang melakukan proses pemakanan sehingga mampu digunakan dalam proses produksi dengan tingkat kerumitan tinggi dan juga dalam produksi masal.

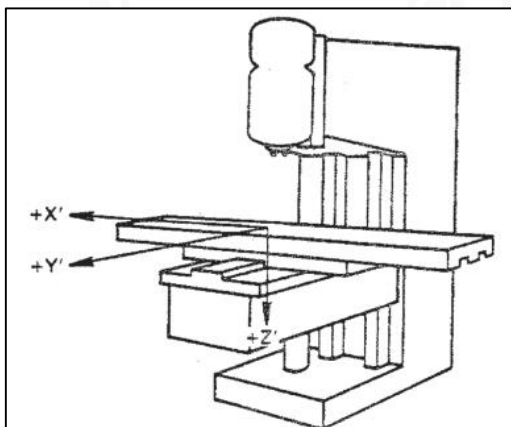


Gambar 2.11 Mesin Milling Denford Micromill EO1037

Sumber : Laboratorium Otomasi Manufaktur Universitas Braijaya

Mesin CNC Denford bergerak menggunakan sistem sumbu koordinat Cartesius. Prinsipnya, *table* pada mesin bergerak secara horizontal dan melintang sementara pahat berputar dan bergerak naik dan turun. Lambang dari persumbuan ini dituliskan sebagai berikut :

1. Sumbu X untuk arah gerak horizontal atau ke kanan dan ke kiri
2. Sumbu Y untuk arah gerak melintang atau kedepan dan ke belakang
3. Sumbu Z untuk arah gerakan vertikal atau keatas dan kebawah



Gambar 2.12 Sistem Persumbuan Mesin Milling

Sumber : Altintas (2012, p.194)

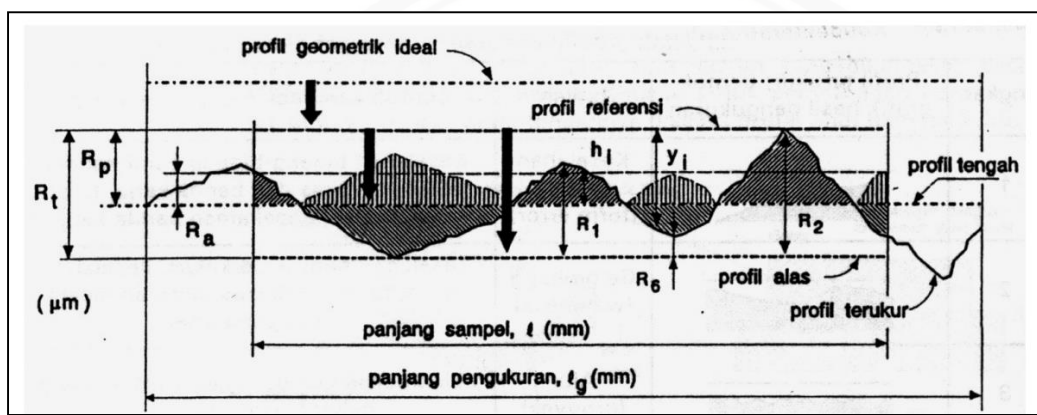
2.5 Material Benda Kerja

Proses permesinan tidak dapat dipisahkan dengan jenis material yang diproses. Pada penelitian ini, peneliti menggunakan material aluminium Al6061. Aluminium komoditi Al6061 utamanya merupakan paduan dari Al-Mg-Si dengan komposisi kimia Al sebesar 97,95%, Mg sebesar 0,808%, Si 0,652% dan sisanya presentase beratnya untuk

Fe, Cu, Mn, Zn, Ti, Cr, Ni, V, dan Cd. Aluminium Al6061 memiliki ketahanan korosi tinggi dan juga sifat *machinability* yang sangat baik.

2.6 Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan (*surface roughness*) didefinisikan sebagai ketidakraturan suatu konfigurasi permukaan yang dapat berupa goresan atau lekukan-lekukan kecil pada suatu benda. Kualitas suatu produk dipengaruhi oleh nilai kekasaran permukaan. Selain itu, material yang memiliki kekasaran permukaan yang tinggi akan cenderung korosif. Gambar di bawah ini menunjukkan beberapa istilah profil permukaan.



Gambar 2.13 Profil Kekasaran Permukaan

Sumber : Rochim (1993, p.56)

Keterangan gambar :

- Profil geometri ideal (*geometrically ideal profile*)
Merupakan profil permukaan geometris ideal yang dapat berupa garis lurus, lingkaran, dan garis lengkung
- Profil terukur (*measured profile*)
Merupakan profil permukaan yang dapat diukur oleh alat ukur. Profil inilah yang dijadikan sebagai data untuk menganalisis karakteristik kekasaran permukaan.
- Profil referensi (*reference profile*)
Merupakan profil yang berguna sebagai referensi untuk menganalisa ketidakraturan konfigurasi permukaan. Profil ini berupa garis lurus atau garis dengan bentuk sesuai dengan profil geometri ideal, serta menyinggung puncak tertinggi dari profil terukur dalam suatu panjang sampel. Biasanya profil ini disebut dengan profil puncak (*custline*).
- Profil dasar (*root profile*)

Merupakan profil yang digeser ke bawah (arah tegak lurus terhadap profil geometris ideal pada suatu panjang sampel) samapai menyentuh titik terendah dari profil terukur.

- Profil tengah (*centered profile*)

Merupakan profil yang berada ditengah-tengah dengan posisi sedemikian rupa yang berfungsi untuk mengetahui luas daerah dibawah profil tengah sampai profil terukur yang ditunjukkan oleh daerah terarsir.

Beberapa parameter permukaan yang lain yaitu:

- Kedalaman total (*peak to valley height*), R_t
Kedalaman total merupakan jarak rata-rata antara profil referensi dan profil dasar.
- Kedalaman perataan (*peak to mean lene*), R_p
Kedalaman perataan merupakan jarak rata-rata antara profil referensi dengan profil terukur, atau dengan kata lain jarak rata-rata profil referensi ke profil tengah.
- Kekasaran rata-rata aritmetis (*mean roughness index*), R_a
Merupakan harga rata-rata aritmetis dari harga absolute antara profil terukur dengan profil profil tengah.
- Kedalaman rata-rata kuadrat (*root mean square height*), R_g
Merupakan akar dari jarak kuadrat rata-rata antara profil terukur dengan profil tengah.

Menurut bentuk profilnya, ketidakraturan konfigurasi suatu permukaan dapat diklasifikasikan beberapa tingkatan, yaitu:

1. Tingkatan pertama adalah ketidakraturan makrogeometri yang berupa kesalahan bentuk (*form error*) yang disebabkan oleh adanya ruang yang longgar pada mesin perkakas sehingga benda kerja menjadi lentur dan terjadi kesalahan posisi ketika pencekaman benda kerja.
2. Tingkatan kedua adalah ketidakraturan yang membentuk seperti gelombang (*waviness*). Hal tersebut terbentuk karena adanya getaran pada saat proses pemotongan dan juga terjadi kesalahan penggunaan perkakas..
3. Tingkatan ketiga adalah ketidakraturan permukaan berbentuk seperti alur (*grooves*) yang disebabkan oleh jejak yang ditinggalkan pahat yang bergetar.

4. Tingkatan keempat adalah serpihan (*flake*) yang menempel pada permukaan benda kerja yang disebabkan karena proses pembentukan geram (*chips*).
5. Tingkatan kelima merupakan kombinasi dari ketidakrataan tingkatan pertama sampai ketidakrataan tingkat keempat.

Tabel 2.1

Angka Kekasaran (*ISO roughness number*) dan Panjang Sampel Standar

Harga kekasaran Ra (μm)	Angka kelas kekasaran	Panjang sampel (mm)
50	N12	8
25	N11	
12.5	N10	2.5
6.3	N9	
3.2	N8	0.8
1.6	N7	
0.8	N6	
0.4	N5	
0.2	N4	0.25
0.1	N3	
0.05	N2	
0.025	N1	0.08

Sumber : Rochim (1993, p.76)

Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kekasaran permukaan ketika proses permesinan, diantaranya :

1. Terjadinya getaran saat proses pemotongan berlangsung.
2. Jenis, bentuk, material, dan ketajaman alat potong.
3. Tingkat kekerasan dari material benda kerja.
4. Laju pemakanan (*feeding*) dan radius ujung pahat (*nose radius tool*)
5. Kondisi pemotongan dari mesin perkakas yang digunakan.

Hubungan antara pemakanan dengan kekasaran permukaan terdapat pada persamaan berikut (Groover, 2013, p.637) :

$$Ra = \frac{f^2}{32NR} \dots \dots \dots (2-8)$$

dengan :

Ra = Kekasaran permukaan rata-rata (μm)

f = *Feed* (mm/rev)

NR = *Nose radius* (mm)

2.7 Getaran pada Proses *Milling*

Parameter lain pada proses *milling* dan proses permesinan lainnya yang cukup penting adalah *machine stiffness* (kekakuan mesin). Mesin yang memiliki nilai kekakuan rendah akan menimbulkan getaran dan *chatter* baik pada komponen mesin itu sendiri maupun pada pahat potong yang akan memberikan efek yang merugikan pada kualitas produk. Mesin yang memiliki getaran dan *chatter* yang tidak terkendali akan mengakibatkan penurunan akurasi geometri, pahat mengalami keausan dini, benda kerja yang kasar, dan kerusakan pada mesin. Ada dua jenis getaran yang terjadi pada proses *milling*:

1. *Forced Vibration* (Getaran Paksa)

Getaran paksa terjadi karena adanya beberapa gaya bersifat periodik yang muncul pada pahat. Gaya ini muncul karena getaran motor, kontak yang terjadi antara roda gigi, ketidakseimbangan komponen mesin, dan juga *misalignment*. Pada proses *milling* getaran paksa juga dapat diakibatkan oleh kontak antara pahat dan benda kerja secara periodik.

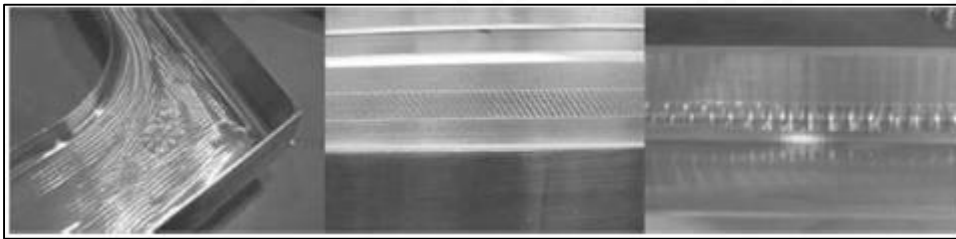
Jika frekuensi getaran yang terjadi mendekati atau bertepatan dengan frekuensi natural dari *machine-tool system*, maka salah satu frekuensi harus dinaikkan atau diturunkan. Untuk mengurangi amplitudo getaran, maka perlu meningkatkan kekakuan sistem atau dengan meningkatkan sistem peredaman. Pemilihan parameter permesinan yang tepat juga akan mengurangi getaran paksa yang terjadi (Kalpakjian & Schmid, 2009)

2. *Self-excited Vibration* (Getaran Tereksitasi Diri)

Self-excited vibration umumnya disebut juga dengan *chatter*, dimana getaran ini terjadi akibat interaksi dari proses *chip-removal* dengan struktur dari pahat. *Self-excited vibration* biasanya memiliki amplitudo yang sangat tinggi. *Chatter* biasanya dimulai dengan gangguan yang terjadi pada area pemotongan. Penyebab yang memungkinkan terjadinya *chatter* adalah jenis geram yang dihasilkan, inhomogenitas permukaan benda kerja, dan perbedaan kondisi gesekan pada *tool-chip interface*.

Jenis *self-excited vibration* yang paling penting adalah *regenerative chatter*, dimana disebabkan ketika pahat memotong permukaan yang memiliki kekasaran ataupun geometri yang kurang baik yang terjadi pada pemotongan sebelumnya. Proses ini berlanjut dan berulang-ulang (Kalpakjian & Schmid, 2009). Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi *chatter* antara lain :

- a. Gaya pemotongan, semakin besar gaya pemotongan maka *chatter* yang terjadi juga semakin besar. Semakin besar *depth of cut* akan meningkatkan gaya pemotongan, selain itu semakin tinggi kekerasan material benda kerja, maka akan meningkatkan gaya pemotongan
- b. Jenis *chip* yang dihasilkan, *continuous chip* akan mengurangi *chatter* yang terjadi, Sedangkan *discontinuous chip* akan meningkatkan terjadinya *chatter*.



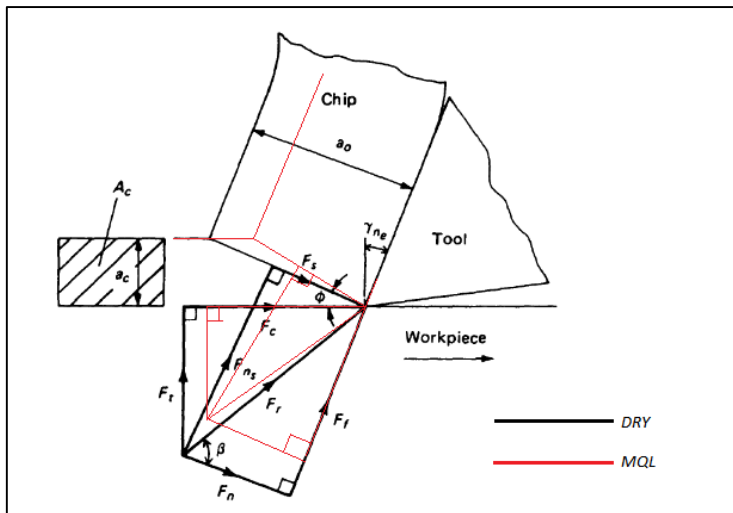
Gambar 2.14 Ciri-ciri benda kerja hasil *milling* yang mengalami *chatter vibration*
Sumber : Davim (2011, p.283)

2.8 Teori Ernst dan Merchant

Piispanen sudah berusaha untuk memecahkan masalah ini pada 1937, namun orang pertama yang menyelesaikan analisis masalah *shear angle solution* adalah Ernst dan Merchant. Pada analisisnya, mereka berasumsi bahwa chip bersifat kaku pada keadaan setimbang saat diberikan gaya dan dipindahkan diantara permukaan pahat dengan benda kerja menuju arah bidang geser (Boothroyd, 1981:90).

Suatu analisis mekanisme pembentukan geram yang dikemukakan oleh Merchant mendasarkan teorinya atas model pemotongan sistem tegak (*orthogonal system*). Sistem pemotongan tegak merupakan penyederhanaan dari sistem pemotongan miring (*oblique system*) dimana gaya diuraikan menjadi komponennya pada suatu bidang.

Gaya yang bekerja dalam pemotongan tegak(*orthogonal*) ditunjukkan pada gambar 2.15



Gambar 2.15 (a) gaya yang bekerja pada area pemotongan dalam dua dimensi (b) Lingkaran gaya untuk menjelaskan gaya yang terjadi di zona pemotongan
Sumber: Kalpakjian (2009: 569)

Sistem gaya pemotongan orthogonal pada penerapannya dapat dilakukan pendekatan dengan memakai pahat dengan sudut potong utama (κ_r) 90° dan sudut miring (λ_s) 0° dengan kecepatan potong yang lebih besar dari kecepatan makan. Saat proses pemotongan berlangsung, gaya F_c akan semakin besar. Daerah permukaan mata potong akan mengalami tegangan geser dengan orientasi dan harga yang bermacam-macam. Salah satu bidang akan mengalami tegangan geser yang paling besar dan dengan meningkatnya hays potong, maka tegangan geser pada bidang tersebut (bidang geser) akan melewati batas elastik (yield) sehingga terjadi deformasi plastis yang menyebabkan proses pembentukan geram. Saat hal ini terjadi lah gaya potong mencapai nilai maksimum. (Rochim 1993:27)

Berdasarkan analisis geometrik dari lingkaran gaya (Merchant), dapat ditentukan rumus untuk gaya potong (F_c) sebagai berikut:

$$F_c = F \cdot \cos (\eta - \gamma_0) , \dots \dots \dots (2-9)$$

Dengan

$$F_s = F \cdot \cos (\phi + \eta - \gamma_0) \dots \dots \dots (2-10)$$

Maka,

$$F_c = \frac{F_s \cos (\eta - \gamma_0)}{\cos (\phi + \eta - \gamma_0)} \dots \dots \dots (2-11)$$

Gaya geser F_s dapat digantikan dengan penampang bidang geser dan tegangan geser yang terjadi pada saat pemotongan yaitu,

$$F_s = A_{shl} \cdot \tau_{shl} \dots\dots\dots (2-12)$$

Dengan demikian rumus gaya potong dari analisa tersebut adalah,

$$F_c = \tau_{shl} \cdot b \cdot h \frac{\cos(\eta - \gamma_o)}{\sin \phi \cos(\phi + \eta - \gamma_o)} \dots\dots\dots (2-13)$$

Dengan :

F_c = Gaya potong (N)

F_s = Gaya Geser (N)

τ_{shl} = Tegangan geser pada bidang geser (N/mm^2)

A_{shl} = Luas bidang geser $A/\sin \phi$ (mm^2)

η = Sudut gesek

γ_o = Sudut geram

ϕ = Sudut geser

Sudut geram γ_o , sudut geser ϕ , dan sudut gesek η (ditentukan oleh koefisien gesek μ) berarti besar atau kecilnya koefisien gesek menentukan besarnya gaya potong F_c .

Coefficient of friction, μ atau biasa yang disebut koefisien gesek dari pahat terhadap benda kerja dapat dicari berdasarkan informasi yang diperoleh melalui dynamometer untuk mengukur gaya secara langsung ketika sedang berlangsung proses pemesian.

Maka koefisien gesek dituliskan dengan persamaan berikut

$$\mu = \tan \eta = \frac{F_f}{F_n} = \frac{F_f + F_c \tan \gamma_o}{F_c - F_f \tan \gamma_o} \dots\dots\dots (2-14)$$

Dengan :

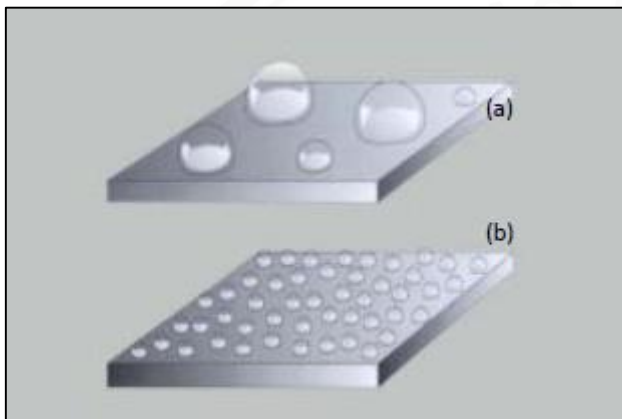
μ = Koefisien gesek

F_f = Gaya gesek (N)

Persamaan (2-14) tersebut menyatakan bahwa koefisien gesek dipengaruhi oleh sudut geram. Akan tetapi rumus tersebut tidak menyatakan bahwa dengan mengubah sudut geram gaya potong dan gaya makan tidak berubah. Dalam pengaplikasiannya, gaya potong (*cutting force*) dan gaya makan berubah dengan berubahnya sudut geram hal ini disebabkan oleh sudut geser ϕ (Rochim, 1993: 29). Jadi besar atau kecilnya koefisien gesek μ berpengaruh pada gaya potong (*cutting force*) yang dihasilkan ketika dalam melakukan pemotongan benda kerja.

2.9 MQL (*Minimum Quantity Lubrication*)

Minimum Quantity Lubrication atau yang selanjutnya akan disebut dengan MQL adalah proses lubrikasi permesinan dengan jumlah *Metal Working Fluid* minimal dalam bentuk *mist*. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan keuntungan dari *wet/flood machining* dalam keadaan *near dry* atau hampir kering. Karena dalam kondisi *wet/flood machining* jumlah *Metal Working Fluid* yang digunakan mencapai 2000ml/min. Sementara pada MQL jumlah MWF yang digunakan berkisar antara 50-500ml/jam dengan tekanan 4-10 Bar (Dhar, 2005) Sehingga, dengan penggunaan *lubricant* yang minimum, selain mendapat kekasaran permukaan yang lebih baik, juga akan memberi dampak lebih ramah terhadap lingkungan daripada proses *flood machining*.



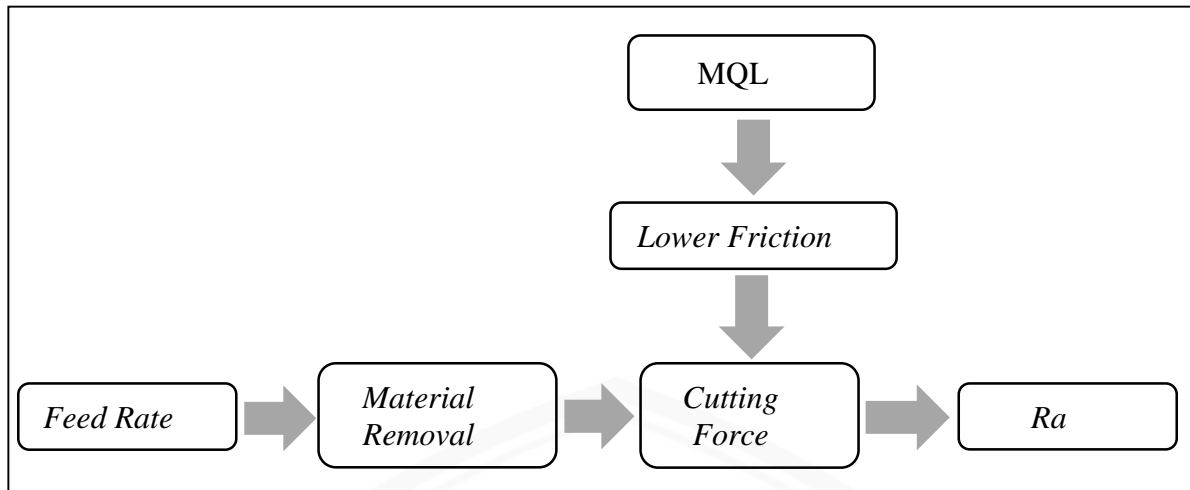
Gambar 2.16 (a) Pelumasan Konvensional (b) MQL
Sumber : Saputra (2017)

2.10 Kerangka Pemikiran

Dari tinjauan pustaka didapatkan bahwa kekasaran permukaan pada proses permesinan dipengaruhi oleh *feed rate* karena *feed rate* akan mempengaruhi *material removal rate* saat proses permesinan yang juga akan mempengaruhi gesekan yang muncul.

Selain itu, *feed rate* juga akan mempengaruhi ketebalan chip sehingga akan mempengaruhi *friction* dan *vibration* yang muncul saat proses permesinan.

Penggunaan MQL pada proses permesinan akan membantu mengurangi nilai koefisien gesek antara benda kerja dan pahat sehingga akan mempengaruhi kualitas kekasaran permukaan dari proses permesinan.



Gambar 2.17 Alur Kerangka Berpikir

2.11 Hipotesis

Berdasarkan tinjauan pustaka yang telah dibuat maka peneliti dapat menarik hipotesis penelitian bahwa kekasaran permukaan pada proses *slot milling* dengan metode *dry* dan MQL akan mengalami perbedaan, dimana Ra pada MQL akan memiliki nilai yang lebih kecil dan juga dipengaruhi oleh *feed rate*.

BAB III

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode penelitian eksperimental (*experimental research*), yaitu melakukan pengamatan untuk mencari data sebab-akibat dalam suatu proses melalui eksperimen sehingga dapat mengetahui pengaruh *feed rate* pada proses *slot milling* menggunakan pahat *end-mill* dengan menggunakan pelumasan Minimum Quantity Lubrication (MQL) sebagai peredam gesekan (*noise friction*) terhadap kekasaran permukaan Aluminium 6061.

3.1 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Otomasi Manufaktur Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya pada bulan April-Mei 2018, dan untuk pengukuran kekasaran dilakukan di Laboratorium Metrologi Industri Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya pada bulan Mei 2016.

3.2 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Variabel bebas

Variabel bebas adalah variabel yang tidak dipengaruhi oleh variabel yang lain. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah:

- *Feed rate* : 25, 50, 75 mm/min

2. Variabel terikat

Variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas yang telah ditentukan dalam penelitian ini. Variabel terikatnya adalah Kekasaran Permukaan (R_a)

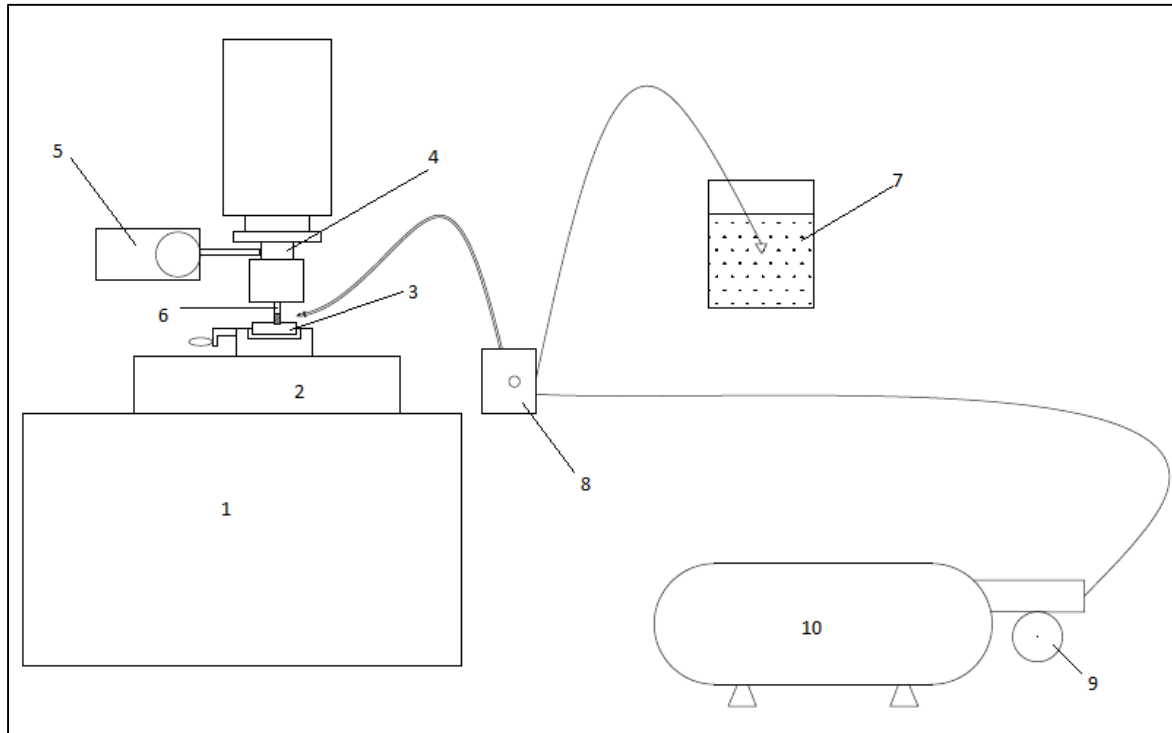
3. Variabel terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya dijaga konstan selama pengujian berlangsung. Variabel terkontrolnya adalah :

- Diameter *end-mill* : 4 mm
- *Spindle Speed* (V) : 2600 rev/min
- *Depth of Cut* : 0.5 mm
- *Mist Flow* : 100 ml/jam

- *Pressure* : 6 bar

3.3 Skema Penelitian



Gambar 3.1 Skema Penelitian

Keterangan :

1. Base
2. Table
3. Benda Kerja
4. Spindle
5. Vibration meter
6. Pahat end mill
7. Pelumas aluminium (Lubricant)
8. MQL
9. Pressure gauge
10. Kompresor

3.4 Spesifikasi Alat dan Bahan

3.4.1 Alat Penelitian

1. Mesin *Milling*



Gambar 3.2 Denford *Micromill* EO1037

Sumber: Denford Manual Book Operation (2010)

- a. Merk = Denford
- b. Jenis = *Micromill* CNC *Milling*
- c. Model = CNC-3A
- d. *Electrical details*
 - *Main supply required* = 1 phase, 220/240 Volts, 8 Amps, 50/60 Hz.
 - *Spindel motor* = 1.5 HP, 1.1 Kw
 - *Axis stepper motor* = 200 steps/rev.
 - *AC servo max. torque* = 11 Nm.
 - *LoVo light* = 110 Volts AC.
- e. *Mechanical Details*
 - *Table Size* = 70 mm x 330 mm
 - *Travel X axis* = 229 mm
 - *Travel Y axis* = 79 mm
 - *Travel Z axis* = 165 mm
 - *Spindel speed* = 0 - 3000 rpm
 - *Machine resolution* = 0.01 mm

2. *Surface Roughness*



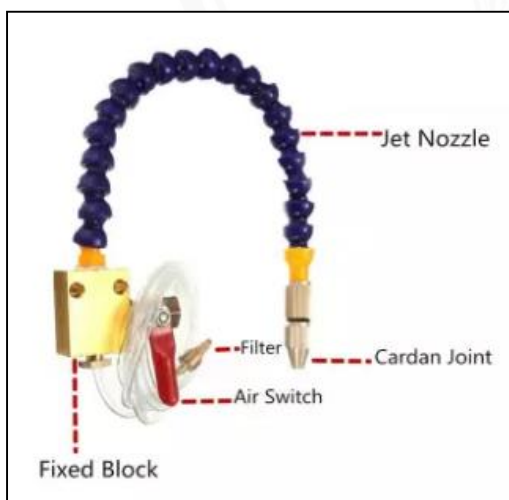
Gambar 3.3 *Surface Roughness Tester SJ-301*

Sumber: Laboratorium Metrologi Industri Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2018)

Digunakan untuk mengukur kekasaran permukaan lubang benda yang akan diteliti.

- | | |
|---------------------------|--|
| a. Merk | = Mitutoyo |
| b. <i>Measuring range</i> | = X axis (12.5 mm) dan Z axis (350 μm) |
| c. Stylus tip material | = Diamond |
| d. Dimensi | = 325 mm x 185 mm x 95 mm |

3. *MQL Mist Coolant Sprayer*



Gambar 3.4 *MQL Mist Coolant Sprayer*

Sumber : Boelkins (2018)

Untuk menyemprotkan *cutting fluid* yang terlebih dulu dicampurkan dengan udara bertekanan.

- a. Merek = Unist
- b. *Air pressure input* = 5-7 Bar
- c. *maximum liquid viscosity* = 68 cST

4. Kompresor Udara



Gambar 3.5 Kompresor Udara Krisbow 1HP *Direct Driven*

Sumber : Laboratorium Mesin Pendingin Teknik Mesin Universitas Brawijaya (2018)

Untuk mensuplai udara bertekanan menuju MQL *Mist Coolant Sprayer*

- a. Merek = Krisbow
 - b. Jenis = 1HP *Direct Driven*
 - c. Detail :
 - Sumber tegangan listrik = 220 V
 - Daya motor = 1 HP
 - Tekanan maksimal = 8 Bar
- Kapasitas tangki penampungan = 8 liter

5. *Height Gauge*



Gambar 3.6 *Height Gauge*

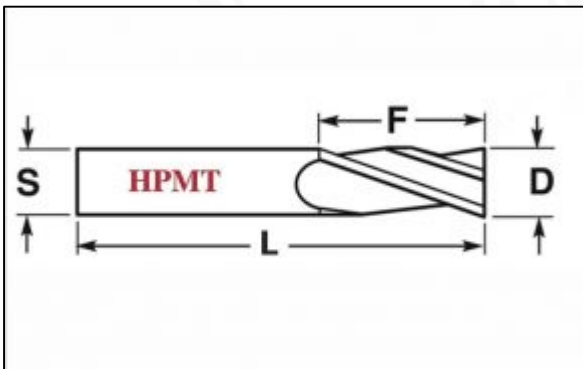
Sumber : Laboratorium Metrologi Industri Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2018)

6. Pahat *End-Mill*



Gambar 3.7 *Endmill cutter*

Sumber : Katalog PT. Guhring Indonesia



Pahat yang digunakan pada penelitian kali ini adalah pahat *square end mill* yang digunakan untuk melakukan proses *slot milling* dengan spesifikasi sebagai berikut :

Merek = BSW
 Type = A 201
 Diameter = 4mm
 Material = HSS
 Jumlah *flute* = 4 buah
Helix angle = 30°

A. *Vibration Meter*



Gambar 3.8 *Vibration Meter*

Sumber: Laboratorium Otomasi Manufaktur Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2016)

- | | |
|---|--------------------------------------|
| a. <i>Vibration pick up accelerometer</i> | : <i>Piezoelectric ceramic</i> |
| b. <i>Measurement range of acceleration</i> | : 0,1 ~ 199,9m/s ² peak |
| c. <i>Measurement range of velocity</i> | : 0,1 ~ 199,9m/s rms |
| d. <i>Measurement accuracy</i> | : ±5% ±2 digits |
| e. <i>Measurement frequency range of acceleration</i> | : 10Hz ~ 1KHz (LO) 1KHz ~ 15KHz (HI) |
| f. <i>Measurement frequency range of velocity</i> | : 10Hz ~ 1KHz (LO) |
| g. <i>Measurement frequency range of displacement</i> | : 10Hz ~ 1KHz (LO) |
| h. <i>Dimensi</i> | : 67x30x183mm |
| i. <i>Weight</i> | : 182g (including battery) |

3.4.2 Bahan Penelitian

A. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah aluminium A6061



Gambar 3.9 Aluminium A6061

Tabel 3.1
Kandungan Aluminium A6061

Unsur	Kadar Presentase (%)
Si	0,652
Fe	0,272
Cu	0,171
Mn	0,020
Mg	0,808
Zn	0,024
Ti	0,024
Cr	0,065
Ni	0,010
V	0,006
Cd	0,002
Al	97,95

Sumber: LIPI (Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia)

Pada penelitian kali ini bahan yang digunakan adalah Aluminium 6061 dengan:

1. *Elongation* : 30 %
2. *Tensile Strength* : 123,5 Mpa
3. *Proportion* : g/cm³

B. Cutting Fluid



Gambar 3.10 Cutting Fluid Tap Matic Plus #2

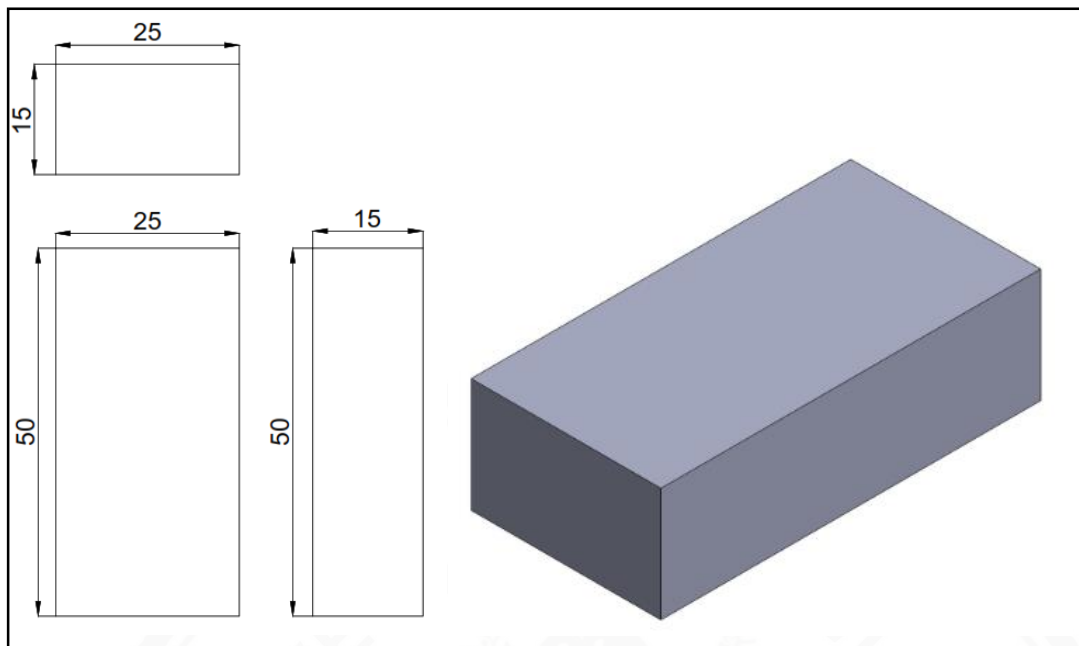
Sumber : LPS Labs (2018)

- a. Merek = LPS
- b. Jenis = Tap Matic Plus #2

Detail :

- Physical State = liquid
- Percent Volatile = 70-75%
- Specific gravity = 0.83-0.85%

3.5 Dimensi Benda Kerja



Gambar 3.11 Dimensi Benda Kerja

3.6 Prosedur Penelitian

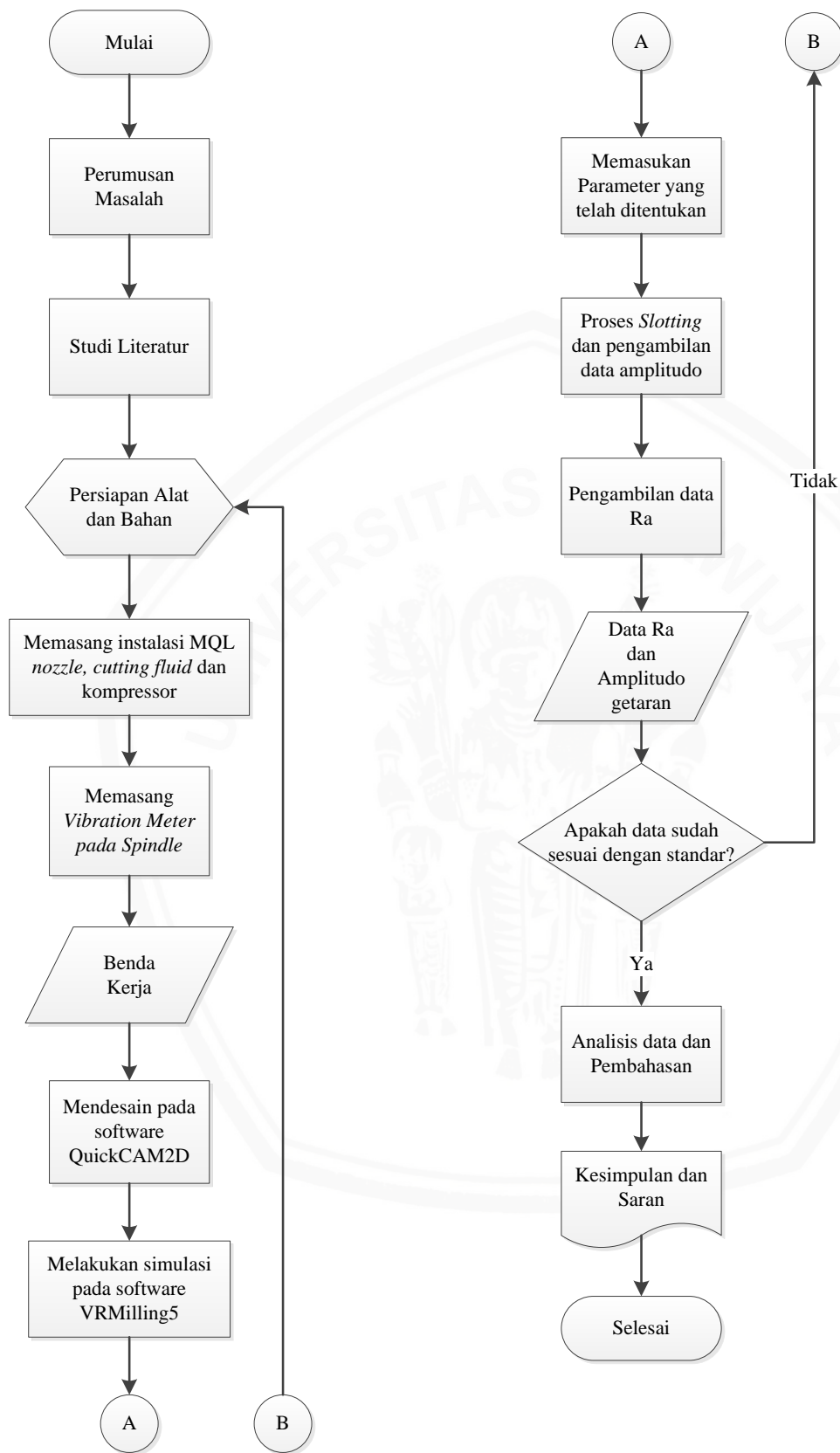
Pada penelitian ini akan dilakukan seperti langkah-langkah sebagai berikut :

1. Mempersiapkan alat dan bahan yaitu pahat *endmill* dengan diameter 4 mm, *cutting fluid*, *air compressor*, selang udara, *nozzle coolant*, *vibration* meter dan Aluminium 6061 dengan dimensi 50mm x 25mm x 15mm.
2. Memasang benda kerja diatas ragum dan ukur posisi tegak lurus dengan *waterpass*.
3. Memasang *vibration* meter pada *Spindle*.
4. Mempersiapkan mesin *milling* CNC dengan langkah sebagai berikut :
 - a. Mendesain benda kerja secara 2D, masukan diameter *tool* 4 mm dan jenis pahat *end-mill* pada *software* QuickCAM2D.
 - b. Buat garis untuk menentukan panjang pemakanan pada *software* QuickCAM2D.
 - c. Melakukan simulasi *cutting process* dan penentuan *datum offset* pada *software* VRMilling5.
5. Melakukan *cutting process* pembuatan *slot* dengan variabel yang telah ditentukan. Dan melakukan pengambilan data *displacement* dan *spectrum frequency* pada 5 titik sampel yang ditentukan.
6. Mengukur kekasaran permukaan 5 titik sample hasil dari tiap variable pemakanan dengan *surface roughness tester* dengan langkah sebagai berikut:

- a. Menentukan standar sampel kekasaran, standar yang digunakan adalah ISO 1998
 - b. Menentukan jenis *profile* yang digunakan, yaitu *profile* R
 - c. Menentukan jenis *filter* yang digunakan yaitu Gauss
 - d. Menentukan traverse length ($\lambda_c=0,25\mu\text{m}$)
 - e. Menentukan nilai $l_n = 5 \times 0,25 = 1,25\mu\text{m}$
 - f. Menempatkan *stylus* pada ujung dari lubang hasil *reaming* (*stylus* harus tegak lurus, perlunya penggunaan *waterpass*)
 - g. Pengukuran dapat dilakukan
7. Mengolah data dan melakukan analisis dari grafik.
 8. Menarik kesimpulan.



3.7 Diagram Alir Penelitian



3.8 Rencana Penelitian

Rancangan penelitian digunakan untuk mencari pengaruh dari suatu faktor pada penilitan ini adalah pengaruh penggunaan metode MQL terhadap kekasaran permukaan Aluminium A6061 pada proses *slot milling* menggunakan pahat *end-mill* dengan variasi *feed rate*.

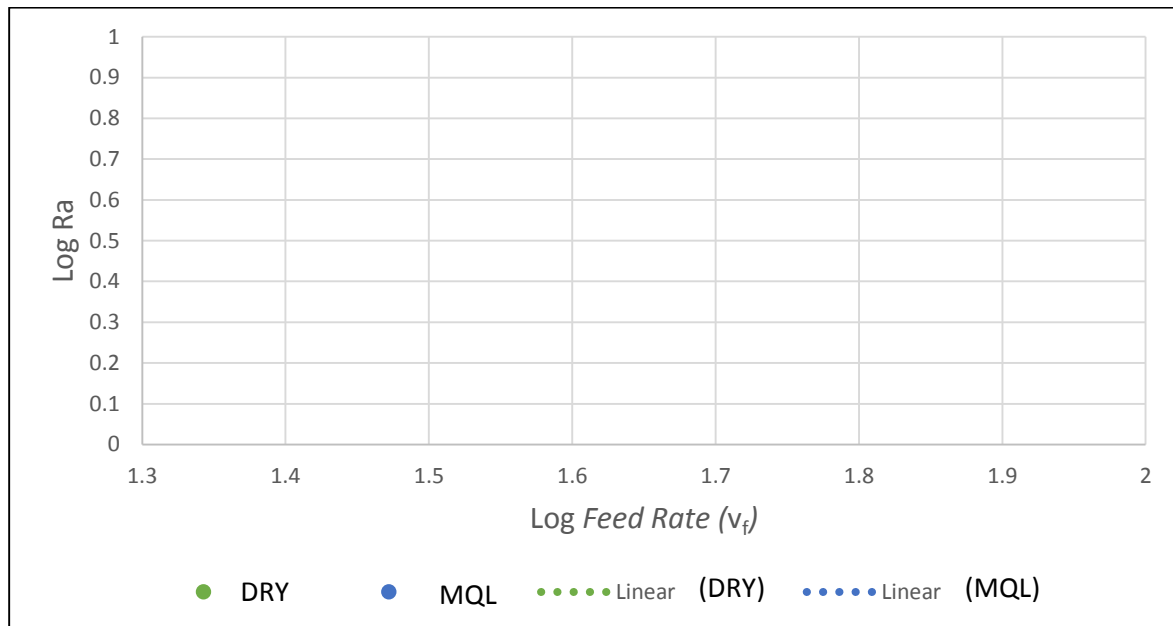
3.8.1 Analisis Data

Pengujian ini meliputi pengukuran kekasaran permukaan pada material Aluminium 6061 pada proses *slot* dengan variasi *feed rate* serta parameter lain pada proses permesinan yang telah ditentukan.

Tabel 3.2
Rancangan Pengambilan Data

Run	Feed rate (mm/min)	Surface Roughness Ra		(μm)	
		Spindle Speed (rev/min)	Dept of cut (mm)	Tanpa MQL	Dengan MQL
1	25	2600	0.5		
2		2600	0.5		
3		2600	0.5		
4	50	2600	0.5		
5		2600	0.5		
6		2600	0.5		
7	75	2600	0.5		
8		2600	0.5		
9		2600	0.5		

3.8.2 Analisis Grafik



Gambar 3.12 Rencana Grafik Ra

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

Data hasil penelitian pengaruh parameter permesinan *feed rate* pada proses *slot milling* dengan metode *Minimum Quantity Lubrication* dan metode *dry* dengan benda kerja aluminium A6061 yang dilakukan di laboratorium Otomasi Manufaktur teknik mesin universitas Brawijaya diambil data kekasaran sebanyak 5 titik *sample* pada tiap hasil permesinan ditampilkan pada tabel 4.1 berikut :

Tabel 4.1
Data Hasil Penelitian

No	FEED RATE	Ra Dry	Rata- Rata	Ra MQL	Rata- Rata
1	25	0.237	0.2804	0.29	0.242
2		0.285		0.222	
3		0.268		0.216	
4		0.299		0.216	
5		0.313		0.266	
6	50	0.283	0.2836	0.314	0.2498
7		0.292		0.242	
8		0.241		0.225	
9		0.277		0.25	
10		0.325		0.218	
11	75	0.69	0.5068	0.247	0.3872
12		0.436		0.381	
13		0.473		0.416	
14		0.5		0.419	
15		0.435		0.473	

4.2 Analisis Data dengan Metode Regresi Linier

Analisis regresi linear digunakan untuk menghitung besarnya pengaruh variabel bebas yaitu *feed rate* terhadap nilai variabel terikat yaitu kekasaran permukaan (R_a).

Analisis data menggunakan metode regresi linier dapat dilakukan jika data memenuhi beberapa persyaratan yaitu data terdistribusi dengan normal, variabel bebas dan terikat memiliki hubungan yang linier.

Fungsi dari kekasaran permukaan (R_a) dipengaruhi oleh *feed rate* (v_f), *axial depth of cut* (a_p), dan juga *spindel speed* (n) sehingga muncul persamaan berikut ini:

$$R_a = C \cdot a_p^{\beta_1} \cdot n^{\beta_2} \cdot v_f^{\beta_3} \dots\dots\dots (4-1)$$

Dimana:

R_a : surface roughness (μm)

C : konstanta

a_p : axial depth of cut (mm)

n : spindle speed (rpm)

v_f : feed rate (mm/min)

$\beta_{1,2,3}$: eksponen dari masing-masing variable

Fungsi persamaan diatas tidak memiliki hubungan yang linier, sehingga perlu adanya transformasi logaritma *double log*.

$$\log R_a = \log C + \beta_1 \log a_p + \beta_2 \log n + \beta_3 \log v_f$$

axial depth of cut dan *spindle speed* bernilai konstan sesuai dengan variabel terkontrol pada penelitian ini, sehingga persamaan diatas dapat ditulis sebagai berikut.

$$\log C + \beta_1 \log a_p + \beta_2 \log n = \text{konstan} = \alpha$$

maka,

$$\log R_a = \beta_3 \log n + \alpha$$

Untuk membantu mempermudah dalam analisis data regresi linear, persamaan diatas diubah menjadi sebagai berikut.

$$Y = \beta_2 X + \alpha$$

Dimana :

$$Y = \log R_a$$

$$X = \log v_f$$

Setelah dilakukan analisis data regresi linear, persamaan tersebut dikembalikan pada persamaan logaritma aslinya.

4.2.1 Analisis Data Regresi Linier Pengaruh *Feed Rate* Terhadap *Surface Roughness* (Ra) pada Pemakanan Kering (*Dry*)

Tabel 4.2

Data Korelasi pada hasil uji regresi linier pemakanan kering (*dry*)

r_{xy}	Beta1	Alpha
0.721818007	0.474453535	-1.254072414

Melalui analisis regresi linier pada Tabel 4.2 diatas didapatkan bahwa koefisien korelasi (r_{xy}) bernilai 0,721818007. Nilai diatas menyatakan pada proses pemakanan *dry* dengan variabel bebas *feed rate* berhubungan terhadap kekasaran permukaan (Ra) sebesar 72.18818007%, sedangkan 27.81181993% lainnya berhubungan dengan variabel lain. Dari data tersebut maka didapatkanlah persamaan linear melalui analisis data regresi linear ini sebagai berikut.

$$Y = 0.474453535 X - 1,254072414$$

Persamaan diatas dikembalikan ke dalam bentuk logaritma awal, sehingga didapatkan persamaan berikut.

$$\log Ra = 0.474453535 \log v_f - 1,254072414$$

$$Ra = v_f^{0.474453535} \cdot 0.055709285$$

Tabel 4.3

Data Regresi Linear Pemakanan Kering (Determinasi)

Sumber	Jumlah Kuadrat	Derajat Bebas	Kuadrat Tengah	$F_{(hitung)}$	$F_{(tabel)}$	R^2
Regresi	0.131038752	1	0.131038752	14.14108	4.67	0.521021235
Galat	0.120464916	13	0.009266532			
Total	0.251503668	14	0.017964548			

Didapatkan hasil data ANOVA pada Tabel 4.3 diatas didapatkan $F_{(hitung)}$ yang lebih besar daripada $F_{(tabel)}$. Hal ini menyatakan persamaan regresi linear berperan dalam keragaman data *surface roughness* (Ra). Nilai R^2 pada tabel diatas menyatakan kesesuaian model persamaan linear *feed rate* rentang 25 – 75 mm/min terhadap *surface roughness* (Ra) dengan pemakanan kering (*dry*) sebesar 52.1021235%.

4.2.2 Analisis Data Regresi Linier Pengaruh *Feed Rate* Terhadap *Surface Roughness* (Ra) pada Pemakanan *Minimum Quantity Lubrication* (MQL)

Tabel 4.4

Data Korelasi pada hasil uji regresi linier pemakanan MQL

r_{xy}	Beta1	Alpha
0.640135172	0.374051386	-1.169147278

Melalui analisis regresi linier pada Tabel 4.3 diatas didapatkan bahwa koefisien korelasi (r_{xy}) bernilai 0,640135172. Nilai diatas menyatakan pada proses pemakanan MQL dengan variabel bebas *feed rate* berhubungan terhadap kekasaran permukaan (Ra) sebesar 64.0135172%, sedangkan 35.9864828% lainnya berhubungan dengan variabel lain. Dari data tersebut maka didapatkanlah persamaan linear melalui analisis data regresi linear ini sebagai berikut.

$$Y = 0.374051386 X - 1,169147278$$

Persamaan diatas dikembalikan ke dalam bentuk logaritma awal, sehingga didapatkan persamaan berikut.

$$\log Ra = 0.374051386 \log v_f - 1,169147278$$

$$Ra = v_f^{0.374051386} \cdot 0.067741174$$

Tabel 4.5

Data Regresi Linear Pemakanan MQL (Determinasi)

Sumber	Jumlah Kuadrat	Derajat Bebas	Kuadrat Tengah	$F_{(hitung)}$	$F_{(tabel)}$	R^2
Regresi	0.046213678	1	0.046213678	5.732978	4.67	0.306037
Galat	0.104793323	13	0.008061025			
Total	0.151007	14	0.010786214			

Didapatkan hasil data ANOVA pada Tabel 4.3 diatas didapatkan $F_{(hitung)}$ yang lebih besar daripada $F_{(tabel)}$. Hal ini menyatakan persamaan regresi linear berperan dalam keragaman data *surface roughness* (Ra). Nilai R^2 pada tabel diatas menyatakan kesesuaian model persamaan linear *feed rate* rentang 25 – 75 mm/min terhadap *surface roughness* (Ra) dengan pemakanan kering (*dry*) sebesar 30.6037%.

4.3 Uji T

Dasar dari pemilihan Uji T pada pembahasan dari penelitian ini dilakukan guna mengetahui pengaruh dari pemakanan dengan menggunakan MQL dibandingkan dengan pemakanan kering (*dry*). Uji T dilakukan di setiap rentang nilai yang dipilih pada *feed rate*.

Pada Uji T ini ditetapkan hipotesis H_0 dan hipotesis pembandingan yaitu H_1 . Diterimanya hipotesis H_0 menyatakan tidak ada penurunan dari nilai kekasaran permukaan (R_a) yang nyata pada pemakanan menggunakan MQL dibandingkan dengan pemakanan kering. Taraf kepercayaan yang digunakan pada uji T adalah 95%. H_0 dinyatakan ditolak ketika $T_{(Hitung)}$ lebih kecil daripada $-T_{(\alpha)}$ dengan α sebesar 5%.

$$H_0 : \mu_{Ra\ MQL} = \mu_{Ra\ dry}$$

$$H_1 : \mu_{Ra\ MQL} < \mu_{Ra\ dry}$$

4.3.1 Feed Rate 25 mm/min

Tabel 4.6

Data Uji T dengan *Feed Rate* 25mm/min

Avg.X ₁	Avg.X ₂	Avg.X ₁ - Avg.X ₂	T(hitung)	-T(alpha)
0.242	0.2804	-0.0384	-1.90821	-1.86

Pada Tabel 4.6 ditampilkan hasil dari Uji T data kekasaran permukaan hasil proses pemesinan dengan *Feed Rate* 25 mm/min. Hasil $T_{(hitung)}$ bernilai -1.90821 yang berarti nilai $T_{(hitung)}$ lebih kecil nilai nya dari $-T_{(\alpha)}$ yaitu -1,86, sehingga dapat disimpulkan pada data kekasaran permukaan dengan *feed rate* 25 mm/min H_0 dinyatakan ditolak.

4.3.2 Feed Rate 50 mm/min

Tabel 4.7

Data Uji T dengan *Feed Rate* 50 mm/min

Avg.X ₁	Avg.X ₂	Avg.X ₁ - Avg.X ₂	T(hitung)	-T(alpha)
0.245	0.2836	-0.0386	-2.08859	-1.86

Pada Tabel 4.7 ditampilkan hasil dari Uji T data kekasaran permukaan hasil proses pemesinan dengan *Feed Rate* 50 mm/min. Hasil $T_{(hitung)}$ bernilai -2.08859 yang berarti nilai $T_{(hitung)}$ lebih kecil nilai nya dari $-T_{(\alpha)}$ yaitu -1,86, sehingga dapat disimpulkan pada data kekasaran permukaan dengan *feed rate* 50 mm/min H_0 dinyatakan ditolak.

4.3.3 Feed rate 75 mm/min

Tabel 4.8

Data Uji T dengan *Feed Rate* 75 mm/min

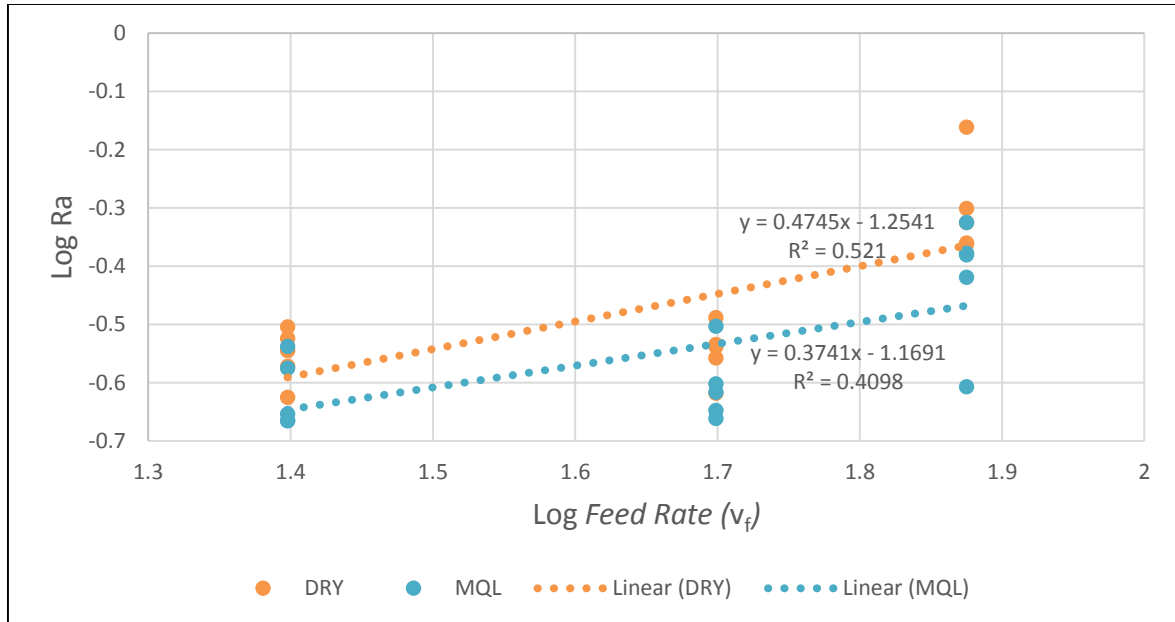
Avg.X₁	Avg.X₂	Avg.X₁ - Avg.X₂	T(hitung)	-T(alpha)
0.3872	0.5068	-0.1196	-1.96867	-1.86

Pada Tabel 4.8 ditampilkan hasil dari Uji T data kekasaran permukaan hasil proses pemesinan dengan *Feed Rate* 75 mm/min. Hasil T(hitung) bernilai -1.96867 yang berarti nilai T(hitung) lebih kecil nilai nya dari -T(alpha) yaitu -1,86, sehingga dapat disimpulkan pada data kekasaran permukaan dengan *feed rate* 75 mm/min H_0 dinyatakan ditolak.



4.4 Grafik dan Pembahasan

4.4.1 Analisis Grafik dan Pembahasan Pengaruh *Minimum Quantity Lubrication* dan Variasi *Feed Rate* Terhadap *Surface Roughness* (R_a)



Gambar 4.1 Grafik hasil analisis regresi pengaruh variabel *Feed Rate* dan *minimum quantity lubrication* terhadap *surface roughness* (R_a) dalam logaritma

Gambar 4.1 di atas menjelaskan hubungan antara *feed rate* dengan kekasaran permukaan (R_a). Berdasarkan gambar grafik di atas, dapat diketahui bahwa sumbu X menampilkan variabel bebas pada penelitian ini dengan menggunakan satuan milimeter per menit sementara sumbu Y menampilkan variabel terikat yaitu kekasaran permukaan (R_a) dalam satuan μm . Titik berwarna oranye melambangkan nilai kekasaran permukaan untuk *feed rate* tertentu sesuai dengan variabel bebas penelitian sedangkan garis linear berwarna oranye merupakan hasil dari persamaan regresi linear dari total 15 data kekasaran permukaan dari proses pemakanan *slot-milling* yang sudah diolah. Baik titik ataupun garis linear berwarna oranye mewakili nilai dari hasil pemakanan dalam kondisi kering (*dry*). Sementara titik berwarna biru melambangkan nilai kekasaran permukaan pada *feed rate* yang sama dengan titik berwarna oranye. Sedangkan garis linear berwarna biru merupakan garis hasil persamaan linear dari hasil 15 data kekasaran permukaan dari proses pemakanan *slot-milling* yang sudah diolah. Baik titik dan garis linear berwarna biru mewakili nilai dari hasil pemakanan dalam kondisi *minimum quantity lubrication* (MQL).

Dapat diketahui bahwa nilai kekasaran permukaan (R_a) berbanding lurus dengan nilai *feed rate*. Dan dapat diketahui pula hasil dari pemakanan dengan kondisi *minimum quantity lubrication* akan menghasilkan nilai kekasaran permukaan (R_a) produk yang lebih rendah dibandingkan dengan pemakanan dengan kondisi kering (*dry*). Hal ini dapat dilihat bahwa pada gambar 4.1 garis linear biru berada di bawah garis linear oranye. Pada pemakanan dengan kondisi kering (*dry*) pada *feed rate* 25mm/min; 50mm/min; dan 75mm/min menghasilkan data dengan rata-rata keakasaran permukaan (R_a) sebesar 0.2804 μm ; 0.285 μm ; dan 0.5068 μm . Sementara pemakanan dengan kondisi *minimum quantity lubrication* (MQL) pada *feed rate* 25mm/min; 50mm/min; dan 75mm/min menghasilkan data dengan rata-rata keakasaran permukaan (R_a) sebesar 0.242 μm ; 0.2498 μm ; dan 0.3872 μm .

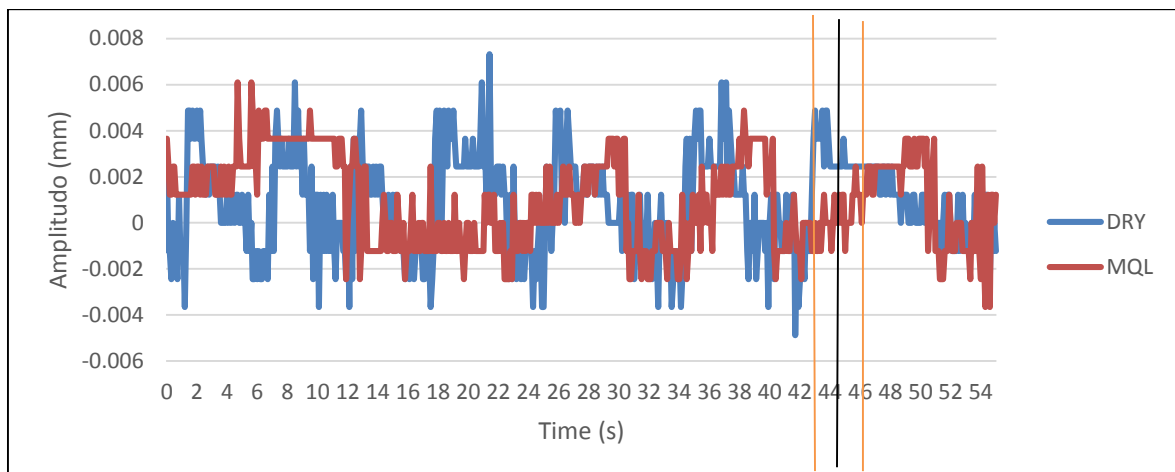
Hal ini memenuhi persamaan (2-8) yang menjelaskan tentang hubungan R_a dengan *feed* dimana nilainya berbanding lurus sehingga jika nilai *feed rate* meningkat akan menghasilkan nilai R_a yang lebih tinggi. Fenomena ini juga sesuai dengan Persamaan (2-2) dimana nilai *feed* per tooth akan naik jika nilai *feed rate* naik.

Selain parameter permesinan, kekasaran permukaan juga bisa di reduksi nilainya dengan penggunaan *cutting fluid* dengan metode *minimum quantity lubrication* (MQL). Seperti yang sudah dijabarkan pada tinjauan pustaka, MQL berfungsi sebagai pereduksi gesekan antara pahat dengan benda kerja saat proses pemakanan yang didukung oleh persamaan (2-13) dan (2-14) yang menyatakan jika koefisien gesek menurun, berdampak pada penurunan *cutting force*. Efek dari penurunan *cutting force* ini adalah penurunan nilai *amplitudo displacement* yang sesuai dengan persamaan (2-9) sehingga berdampak pada menurunnya nilai kekasaran permukaan (R_a) produk.

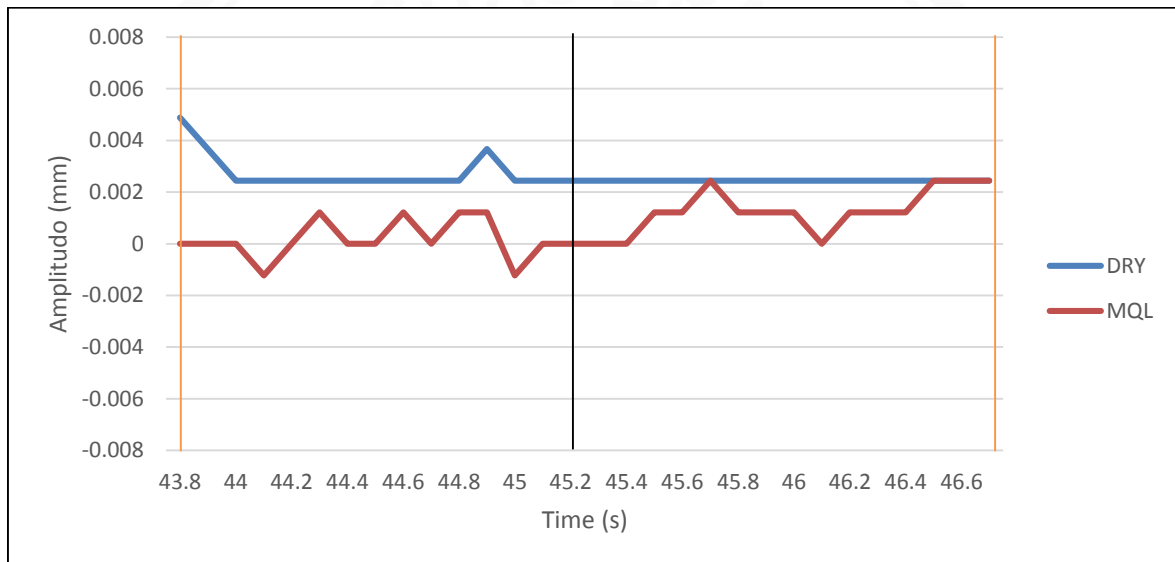
4.4.2 Analisis Grafik dan Pembahasan Amplitudo Displacement Terhadap Proses Slot Milling Pemakanan Kering (*Dry*) dan *Minimum Quantity Lubrication*

Data *amplitudo displacement* diambil selama proses pemakanan benda kerja berlangsung. Data ini digunakan untuk mengetahui *chatter* yang terjadi selama proses pemakanan benda kerja yang kemudian dianalisis pengaruhnya terhadap nilai kekasaran permukaan benda kerja. Pengambilan data *amplitudo displacement* selama proses pemakanan dibantu dengan *software* National Instrument LabView MyRio 2013.

1. *Feed Rate 25 mm/min*

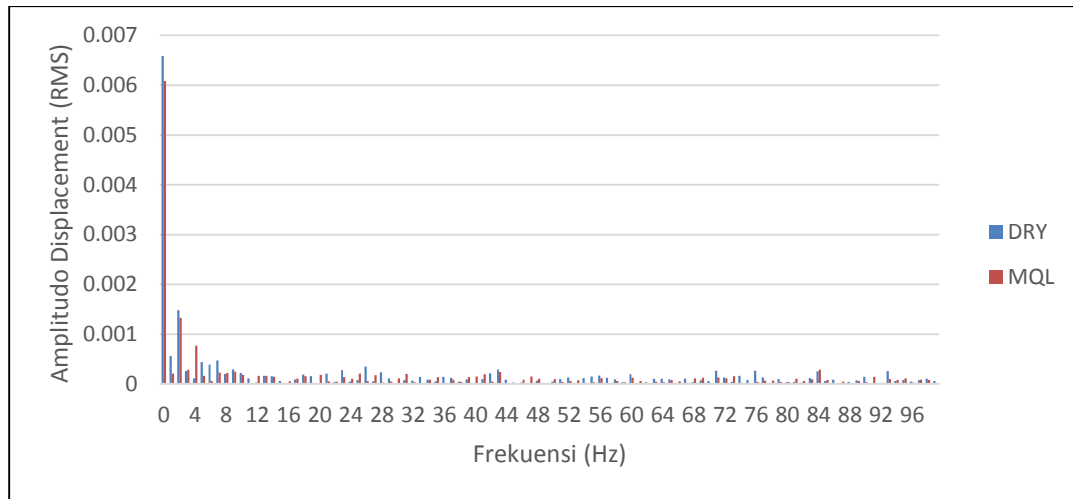


Gambar 4.2 Data keseluruhan *Amplitude Displacement* pada Proses *Slot-milling* dengan *Feed Rate 25 mm/min* tanpa dan dengan Pengaplikasian MQL

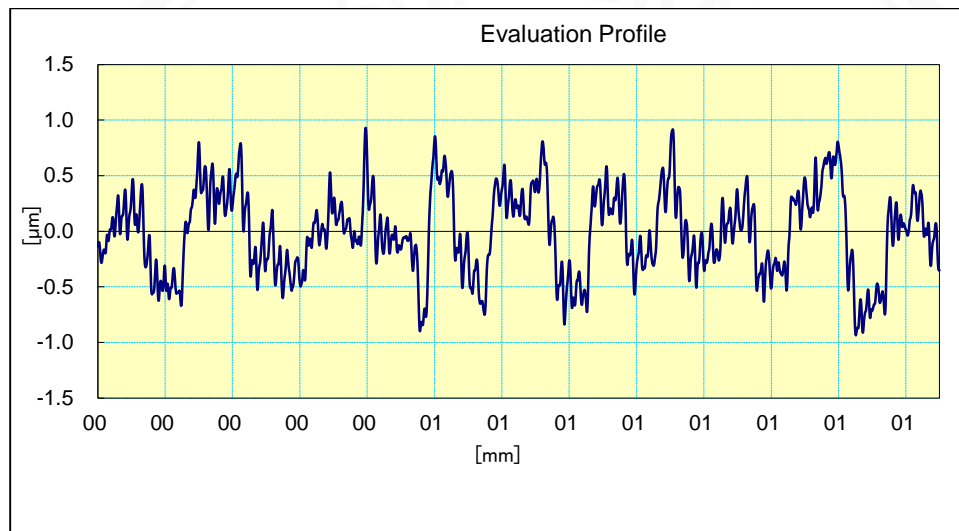


Gambar 4.3 Data sepanjang 1,25 mm *Amplitude Displacement* pada Proses *Slot-milling* dengan *Feed Rate 25mm/min* tanpa dan dengan Pengaplikasian MQL

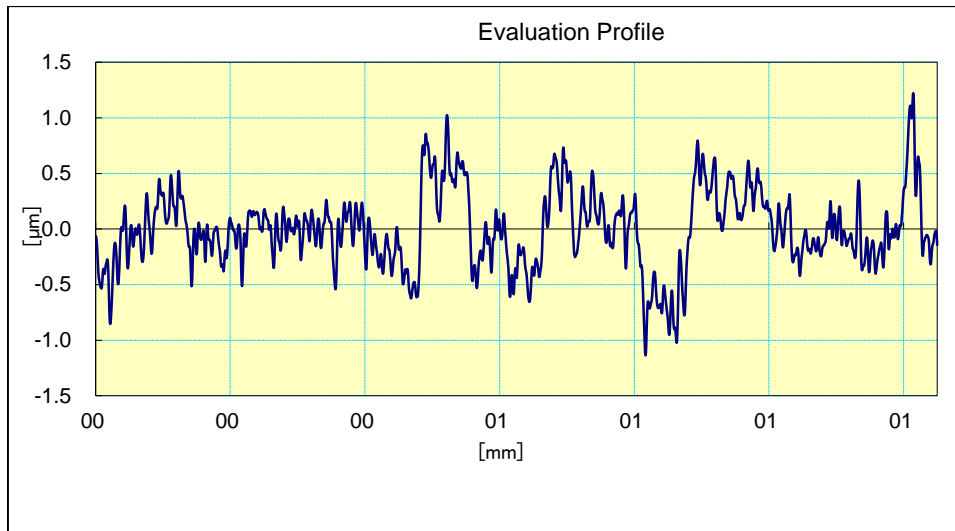
Dari grafik diatas, gambar 4.2 menampilkan nilai *amplitude displacement* di sepanjang waktu proses pemakanan sementara gambar 4.3 menampilkan data pada waktu pemesinan $t = 43.8 - 46.7$ detik atau sepanjang sampel yang diambil nilai kekasaran permukaannya yaitu 1,25mm.



Gambar 4.4 Data *Spectrum Frequency* pada Proses *Slot-milling* dengan *Feed Rate* 25mm/min tanpa dan dengan Pengaplikasian MQL pada $t = 45.2$ detik



Gambar 4.5 Data Kekasaran Permukaan dengan *Feed Rate* 25 mm/min pada Proses *Slot-milling* pemakanan kering (*dry*) sepanjang $t = 43,8 - 48,7$ detik



Gambar 4.6 Data Kekasaran Permukaan dengan *Feed Rate* 25 mm/min pada Proses *Slot-milling* pemakanan dengan *minimum quantity lubrication* (MQL) sepanjang $t = 43,8 - 48,7$ detik

Pada waktu pemakanan ke 45.2 detik diambil pula data *spectrum frequency* yang dihasilkan pada kedua proses permesinan sesuai pada Gambar 4.4 dan hasil pengujian kekasaran permukaan yang ditampilkan pada gambar 4.5 dan 4.6,

Berdasarkan tinjauan pustaka, resonansi akan terjadi bila perbandingan antara *natural frequency* dari *feed rate* menghasilkan nilai bulat atau integer. Apabila perbandingan menghasilkan selain nilai bulat atau integer, maka proses permesinan tersebut terdampak oleh *regenerative chatter* yang dapat dilihat pada persamaan (2-10). Dari *feed rate* kita dapat mengetahui berapa besarnya frekuensi natural yang dimiliki, kemudian dibandingkan dengan frekuensi eksitasinya. Dari perbandingan tersebut didapatkan nilai yang tidak bulat sehingga fenomena yang timbul pada segmen ini merupakan *regenerative chatter*. Fenomena *regenerative chatter* terjadi akibat kegagalan pahat untuk tetap stabil di titik seimbangnya saat proses pemakanan yang salah satu faktornya adalah *cutting force*. Nilai *cutting force* yang fluktuatif akan mempengaruhi besaran nilai dari *amplitude displacement*.

Tabel 4.9

Rentang Waktu Pengambilan Data *Amplitude Displacement*, dan Kekasaran Permukaan (Ra) Pemakanan Kering (*dry*) dengan *Feed Rate* 25 mm/min

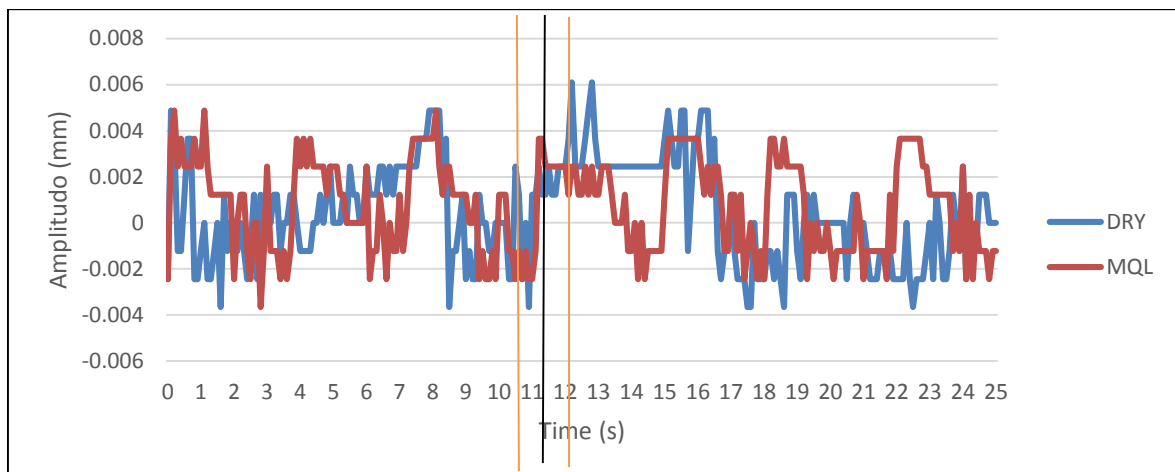
Sampel	Selang Waktu (menit : detik)	<i>Displacement</i> (rms)	Kekasaran Permukaan (μm)
Sampel 1	00:07,9 - 00:10,8	0.00610351	0.237
Sampel 2	00:16,7 - 00:19,6	0.00488281	0.285
Sampel 3	00:25,9 - 00:28,8	0.00488281	0.268
Sampel 4	00:34,9 - 00:37,8	0.00610351	0.299
Sampel 5	00:43,8 - 00:46,7	0.00488281	0.313
Rata-rata		0.00537	0.2804

Tabel 4.10

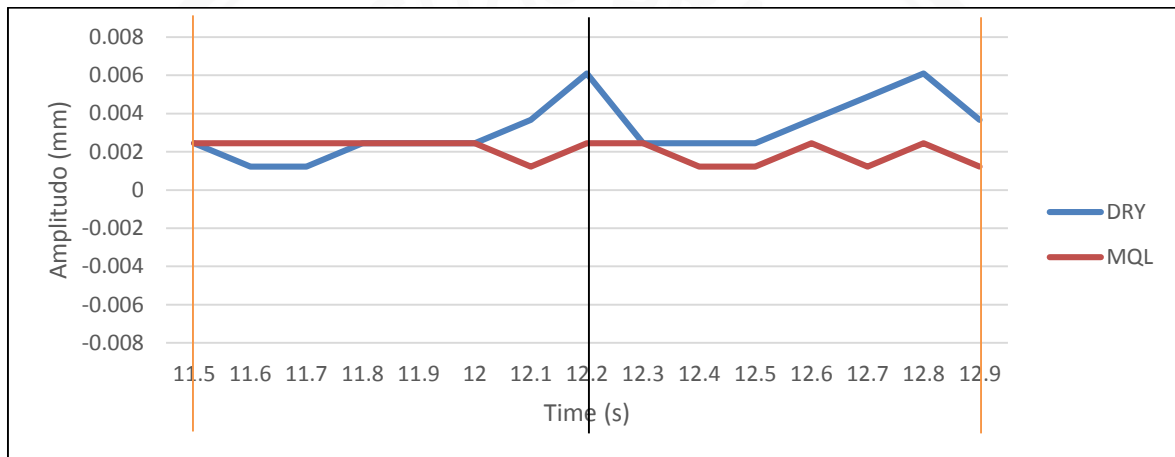
Rentang Waktu Pengambilan Data *Amplitude Displacement*, dan Kekasaran Permukaan (Ra) Pemakanan MQL dengan *Feed Rate* 25 mm/min rpm

Sampel	Selang Waktu (menit : detik)	<i>Displacement</i> (rms)	Kekasaran Permukaan (μm)
Sampel 1	00:07,9 - 00:10,8	0.00488281	0.29
Sampel 2	00:16,7 - 00:19,6	0.00244141	0.222
Sampel 3	00:25,9 - 00:28,8	0.00244141	0.216
Sampel 4	00:34,9 - 00:37,8	0.00244141	0.216
Sampel 5	00:43,8 - 00:46,7	0.00244141	0.266
Rata-rata		0.00292969	0.242

2. Feed Rate 50 mm/min

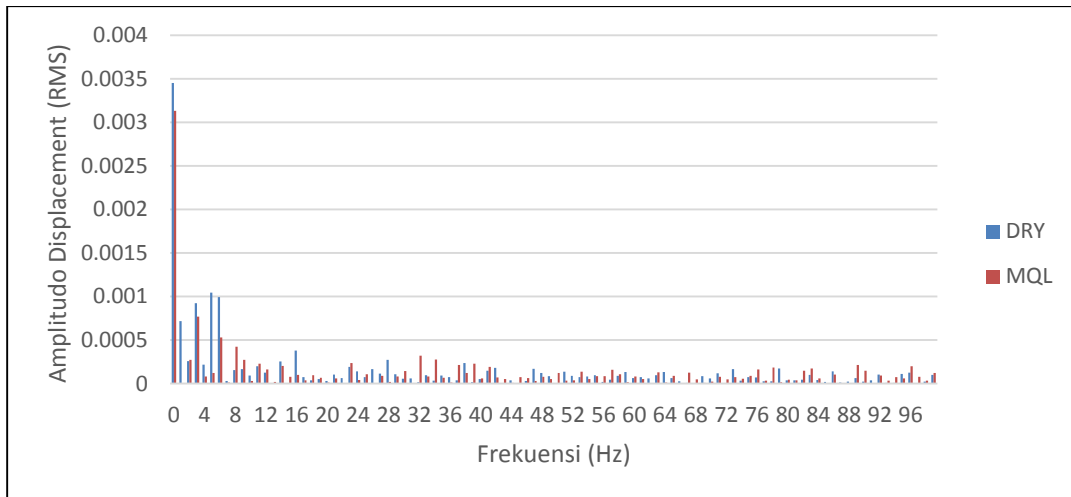


Gambar 4.7 Data keseluruhan *Amplitude Displacement* pada Proses *Slot-milling* dengan *Feed Rate* 50 mm/min tanpa dan dengan Pengaplikasian MQL

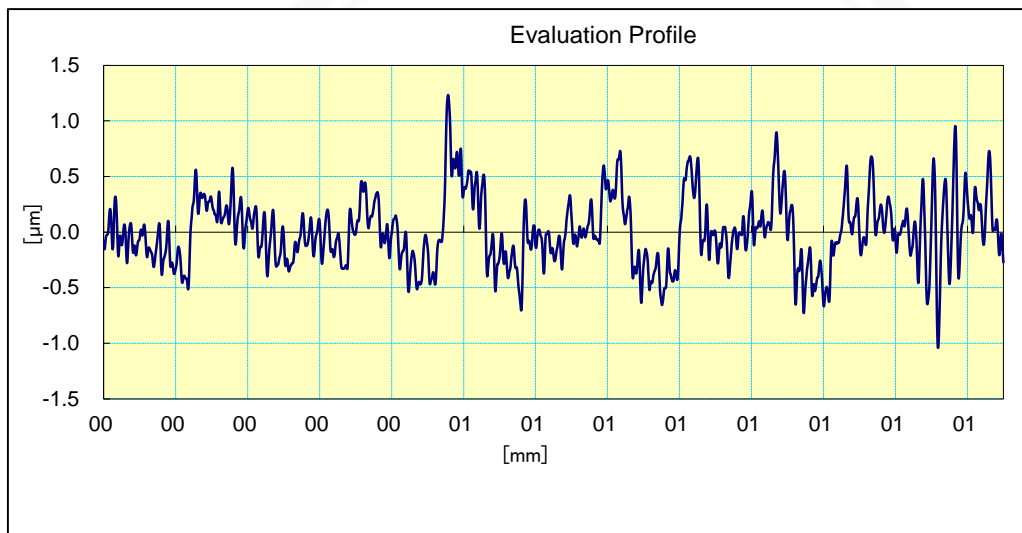


Gambar 4.8 Data sepanjang 1,25 mm *Amplitude Displacement* pada Proses *Slot-milling* dengan *Feed Rate* 50mm/min tanpa dan dengan Pengaplikasian MQL

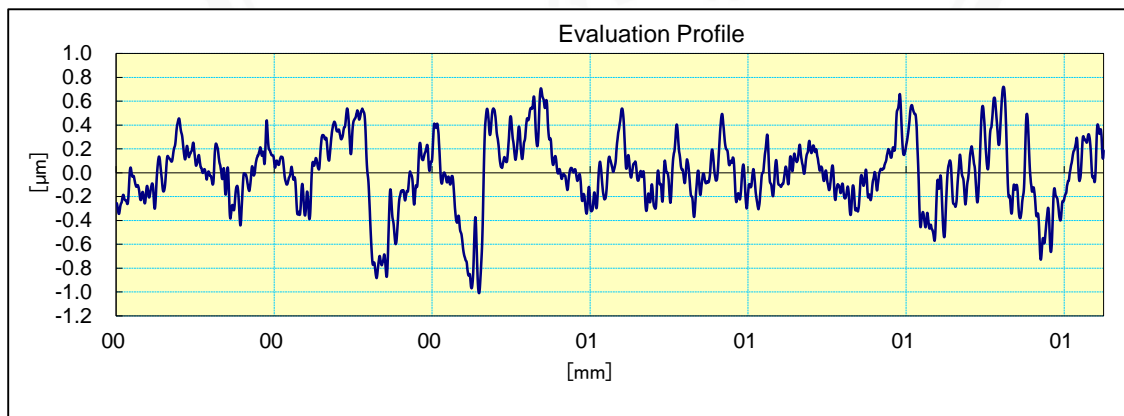
Dari grafik diatas, gambar 4.7 menampilkan nilai *amplitude displacement* di sepanjang waktu proses pemakanan sementara gambar 4.8 menampilkan data pada waktu pemesinan $t = 11.5 - 12.9$ detik atau sepanjang sampel yang diambil nilai kekasaran permukaannya yaitu 1,25mm.



Gambar 4.9 Data *Spectrum Frequency* pada Proses *Slot-milling* dengan *Feed Rate* 50mm/min tanpa dan dengan Pengaplikasian MQL pada $t = 12.2$ detik



Gambar 4.10 Data Kekasaran Permukaan dengan *Feed Rate* 25 mm/min pada Proses *Slot-milling* pemakanan kering (*dry*) sepanjang $t = 11,5 - 13,9$ detik



Gambar 4.11 Data Kekasaran Permukaan dengan *Feed Rate* 50 mm/min pada Proses *Slot-milling* pemakanan dengan *minimum quantity lubrication* (MQL) sepanjang $t = 11,5 - 13,9$ detik

Pada waktu pemakanan ke 12.2 detik diambil pula data *spectrum frequency* yang dihasilkan pada kedua proses permesinan sesuai pada Gambar 4.9 dan hasil pengujian kekasaran permukaan yang ditampilkan pada gambar 4.10 dan 11

Berdasarkan tinjauan pustaka, resonansi akan terjadi bila perbandingan antara *natural frequency* dari *feed rate* menghasilkan nilai bulat atau integer. Apabila perbandingan menghasilkan selain nilai bulat atau integer, maka proses permesinan tersebut terdapat oleh *regenerative chatter* yang dapat dilihat pada persamaan (2-10). Dari *feed rate* kita dapat mengetahui berapa besarnya frekuensi natural yang dimiliki, kemudian dibandingkan dengan frekuensi eksitasinya. Dari perbandingan tersebut didapatkan nilai yang tidak bulat sehingga fenomena yang timbul pada segmen ini merupakan *regenerative chatter*. Fenomena *regenerative chatter* terjadi akibat kegagalan pahat untuk tetap stabil di titik seimbangnyaa saat proses pemakanan yang salah saatu faktornya adalah *cutting force*. Nilai *cutting force* yang fluktuatif akan mempengaruhi besaran nilai dari *amplitude displacement*.

Tabel 4.11

Rentang Waktu Pengambilan Data *Amplitude Displacement*, dan Kekasaran Permukaan (Ra) Pemakanan Kering (*dry*) dengan *Feed Rate* 50 mm/min

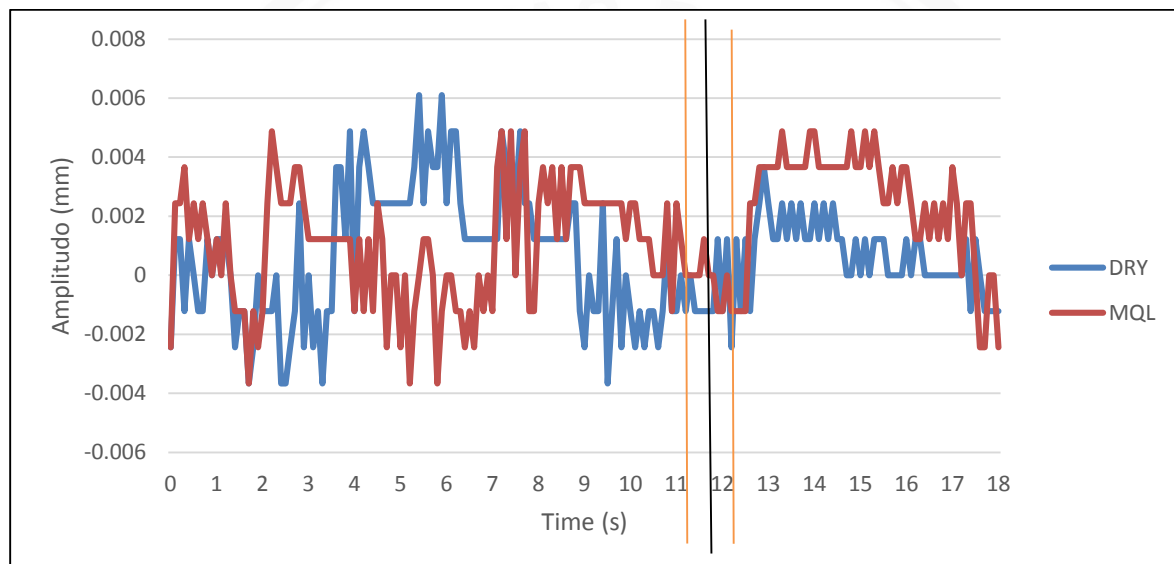
Sampel	Selang Waktu (menit : detik)	<i>Displacement</i> (rms)	Kekasaran Permukaan (μm)
Sampel 1	00:03,3 - 00: 04,8	0.0012207	0.29
Sampel 2	00:07,3 - 00:08,8	0.00488281	0.292
Sampel 3	00:11,5 - 00:12,9	0.00610351	0.241
Sampel 4	00:15,4 - 00:16,8	0.00488281	0.277
Sampel 5	00:19,3 - 00:20,8	0.0012207	0.325
Rata-rata		0.00322265	0.285

Tabel 4.12

Rentang Waktu Pengambilan Data *Amplitude Displacement*, dan Kekasaran Permukaan (Ra) Pemakanan MQL dengan *Feed Rate* 50 mm/min rpm

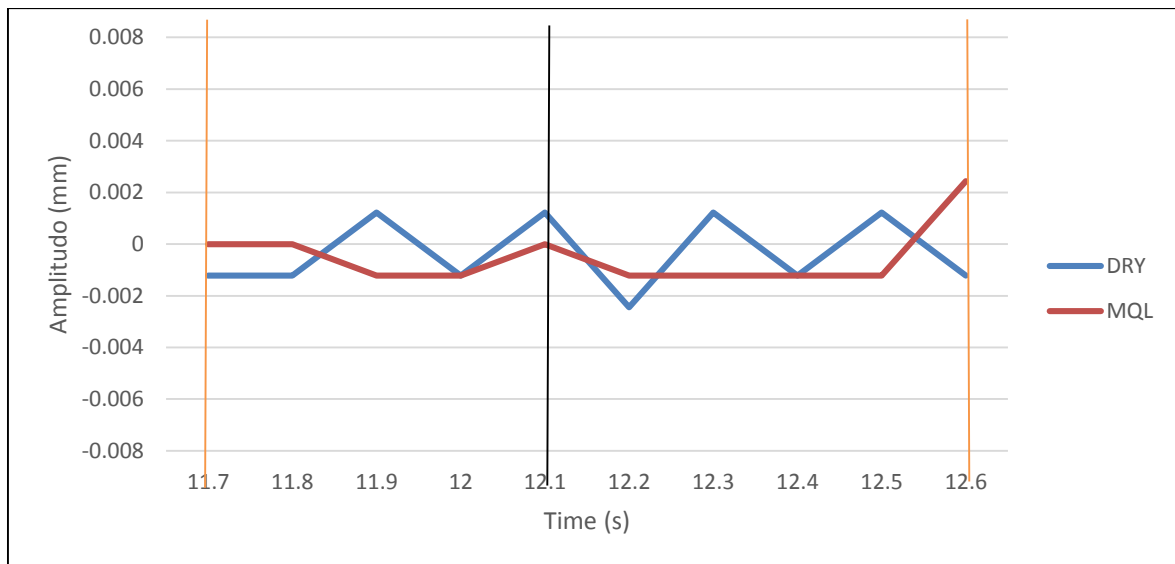
Sampel	Selang Waktu (menit : detik)	<i>Displacement</i> (rms)	Kekasaran Permukaan (μm)
Sampel 1	00:03,3 - 00: 04,8	0.00366211	0.314
Sampel 2	00:07,3 - 00:08,8	0.00488281	0.242
Sampel 3	00:11,5 - 00:12,9	0.00244141	0.225
Sampel 4	00:15,4 - 00:16,8	0.00366211	0.25
Sampel 5	00:19,3 - 00:20,8	0.0012207	0.218
Rata-rata		0.0029541	0.2498

3. *Feed Rate* 75 mm/min

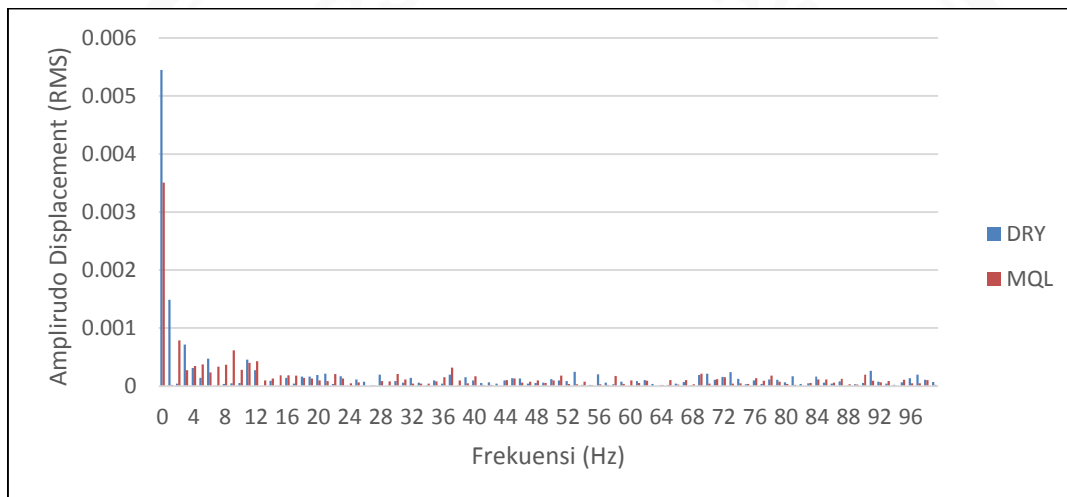


Gambar 4.12 Data keseluruhan *Amplitude Displacement* pada Proses *Slot-milling* dengan *Feed Rate* 75 mm/min tanpa dan dengan Pengaplikasian MQL

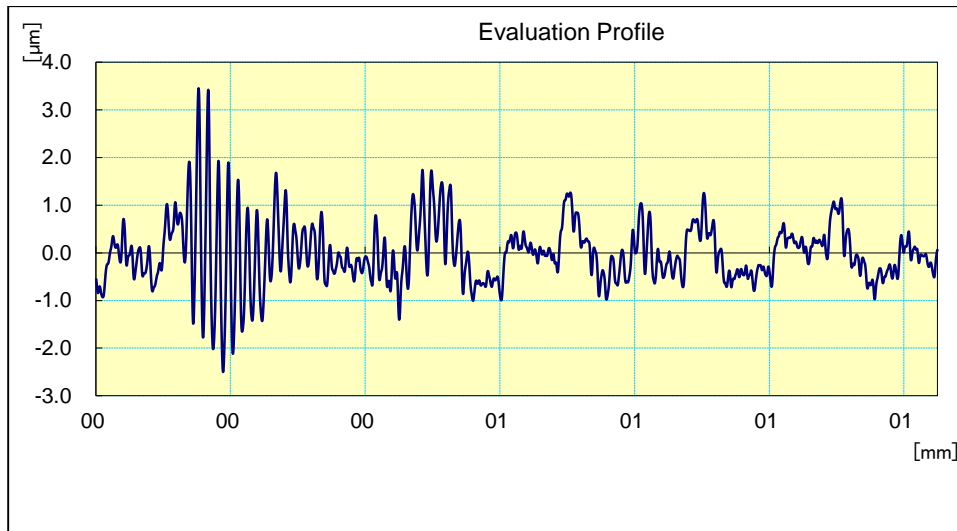
Dari grafik diatas, gambar 4.12 menampilkan nilai *amplitude displacement* di sepanjang waktu proses pemakanan sementara gambar 4.13 menampilkan data pada waktu pemesinan $t = 11.7 - 12.6$ detik atau sepanjang sampel yang diambil nilai kekasaran permukaannya yaitu 1,25mm.



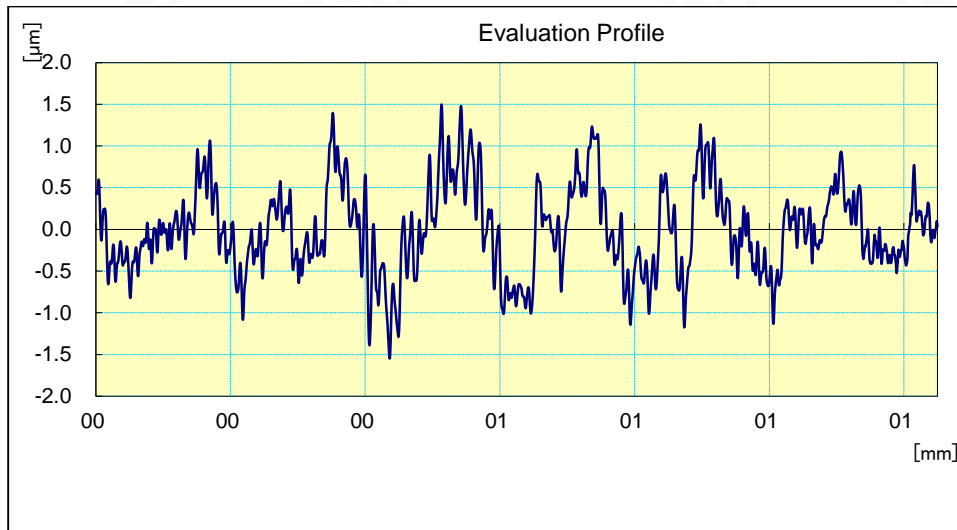
Gambar 4.13 Data sepanjang 1,25 mm *Amplitude Displacement* pada Proses *Slot-milling* dengan *Feed Rate* 75 mm/min tanpa dan dengan Pengaplikasian MQL



Gambar 4.14 Data *Spectrum Frequency* pada Proses *Slot-milling* dengan *Feed Rate* 75 mm/min tanpa dan dengan Pengaplikasian MQL pada $t = 12.1$ detik



Gambar 4.15 Data Kekasaran Permukaan dengan *Feed Rate* 75 mm/min pada Proses *Slot-milling* pemakanan kering (*dry*) sepanjang $t = 11,7 - 12,6$ detik



Gambar 4.16 Data Kekasaran Permukaan dengan *Feed Rate* 50 mm/min pada Proses *Slot-milling* pemakanan dengan *minimum quantity lubrication* (MQL) sepanjang $t = 11,7 - 12,6$ detik

Pada waktu pemakanan ke 12.1 detik diambil pula data *spectrum frequency* yang dihasilkan pada kedua proses permesinan sesuai pada Gambar 4.14 dan hasil pengujian kekasaran permukaan yang ditampilkan pada gambar 4.15 dan 4.16.

Berdasarkan tinjauan pustaka, resonansi akan terjadi bila perbandingan antara *natural frequency* dari *feed rate* menghasilkan nilai bulat atau integer. Apabila perbandingan menghasilkan selain nilai bulat atau integer, maka proses permesinan tersebut terdampak oleh *regenerative chatter* yang dapat dilihat pada persamaan (2-10). Dari *feed rate* kita dapat mengetahui berapa besarnya frekuensi natural yang dimiliki, kemudian

dibandingkan dengan frekuensi eksitasinya. Dari perbandingan tersebut didapatkan nilai yang tidak bulat sehingga fenomena yang timbul pada segmen ini merupakan *regenerative chatter*. Fenomena *regenerative chatter* terjadi akibat kegagalan pahat untuk tetap stabil di titik seimbangnya saat proses pemakanan yang salah satu faktornya adalah *cutting force*. Nilai *cutting force* yang fluktuatif akan mempengaruhi besaran nilai dari *amplitude displacement*.

Tabel 4.13

Rentang Waktu Pengambilan Data *Amplitude Displacement*, dan Kekasaran Permukaan (Ra) Pemakanan Kering (*dry*) dengan *Feed Rate* 50 mm/min

Sampel	Selang Waktu (menit : detik)	<i>Displacement</i> (rms)	Kekasaran Permukaan (μm)
Sampel 1	00:02,8 - 00: 03,7	0.00366211	0.69
Sampel 2	00:05,7 - 00:06,6	0.00610351	0.436
Sampel 3	00:08,8 - 00:09,7	0.00244141	0.473
Sampel 4	00:11,7 - 00:12,6	0.0012207	0.5
Sampel 5	00:14,8 - 00:15,7	0.0012207	0.435
Rata-rata		0.00249023	0.5608

Tabel 4.14

Rentang Waktu Pengambilan Data *Amplitude Displacement*, dan Kekasaran Permukaan (Ra) Pemakanan MQL dengan *Feed Rate* 50 mm/min rpm

Sampel	Selang Waktu (menit : detik)	<i>Displacement</i> (rms)	Kekasaran Permukaan (μm)
Sampel 1	00:02,8 - 00: 03,7	0.00366211	0.247
Sampel 2	00:05,7 - 00:06,6	0.00366211	0.381
Sampel 3	00:08,8 - 00:09,7	0.00366211	0.416
Sampel 4	00:11,7 - 00:12,6	0.00244141	0.419
Sampel 5	00:14,8 - 00:15,7	0.00488281	0.473
Rata-rata		0.00366211	0.3872



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Parameter pemesinan *feed rate* pada proses pemesinan Aluminium A6061 berpengaruh terhadap hasil kekasaran permukaan produk baik dalam kondisi kering (*dry*) maupun pada kondisi penggunaan metode *minimum quantity lubrication* (MQL). Dimana semakin tinggi nilai *feed rate*, maka kekasaran permukaan produk baik pada kondisi kering (*dry*) maupun pada kondisi *minimum quantity lubrication* (MQL)
 - a. Pada *feed rate* 25 mm/min, kekasaran permukaannya adalah 0.2804 μm pada kondisi *dry* dan 0.242 μm pada kondisi MQL.
 - b. Pada *feed rate* 50 mm/min, kekasaran permukaannya adalah 0.285 μm pada kondisi *dry* dan 0.2498 μm pada kondisi MQL.
 - c. Pada *feed rate* 75 mm/min, kekasaran permukaannya adalah 0.5068 μm pada kondisi *dry* dan 0.3872 μm pada kondisi MQL.
2. Melakukan proses pemesinan dengan kondisi *minimum quantity lubrication* mampu mereduksi nilai kekasaran permukaan dari Aluminium A6061 di mana pada kondisi *dry*, nilai persamaan Ra nya adalah:

$$\log Ra = 0.474453535 \log n - 1,254072414,$$
 sementara pada kondisi MQL nilai persamaan Ra nya adalah

$$\log Ra = 0.374051386 \log n - 1,169147278$$

5.2 Saran

1. Penelitian selanjutnya agar dapat menggunakan magnet sebagai upaya mengurangi *chatter* dibawah kondisi MQL sebagai upaya mereduksi kekasaran permukaan dan bagai dampaknya terhadap kekasaran permukaan benda kerja
2. Guna melengkapi penelitian ini, variasi debit *cutitng fluid* tekanan udara untuk melihat dampak dari variasi debit dan tekanan udara terhadap kekasaran permukaan

DAFTAR PUSTAKA

- Boothroyd, Geoffrey. 1981. *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*. Washington, D.C : McGraw-Hill International Book Company.
- Davim, Paulo J. (2011). *Modern Machining Technology*. Cambridge: Woodhead Publishing in Mechanical Engineering.
- Dhar. N.R. 2005. *Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel*. Journal of Materials Processing Technology Volume 172.
- El-Hofy, Hassan. 2014. *Fundamentals of Machining Process: Conventional and Non-Conventional Process*. London: CRC Press.
- Groover, Mikell. P. 2012. *Fundamental Of Modern Manufacturing Material, Processes, and System 4th Edition*. College of Engineering and Applied Science, Lehigh University : Dr. Gregory L. Tonkay.
- Kalpakjian, Schmid, Musa. 2009. *Manufacturing Engineering and Technology Sixth Edition in SI Units*. New York. Komel F. Ehmann.
- Kunda Kr. 2014. *Dynamic Stability of High Speed Micromilling Based on Modal Analysis for Determining the Tool-tip Dynamics*. Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Bombay, Powai, Mumbai, India.
- Kuttolamadam, Mathew A. 2010. *Effect of Machining Feed on Surface Roughness in Cutting 6061 aluminum*. International Center for Automotive Research, Clemson University, Greenville.
- Muller, P. (2012). *Reaming Process Improvement And Control: And Application Of Statistical Engineering* . CIRP Journal Of Manufacturing Science And Technology , 197.
- Okokpujie, Imhade P. 2015. *Effects of Cutting Parameters on Surface Roughness during End Milling of Aluminium under Minimum Quantity Lubrication*. Department of Mechanical Engineering, Nnamdi Azikiwe University, Nigeria.
- Okonkwo, Ugochukwu. 2015. *Cutting Parameters Effects on Surface Roughness During End Milling of Aluminium 6061 Alloy Under Dry Machining Operation*. Department of Mechanical Engineering, Nnamdi Azikiwe University, Nigeria.
- Rochim, T. 1993. *Spesifikasi, Metrologi & Kontrol Kualitas Geometrik, Proses Permesinan*. Bandung : Penerbit ITB

- Saputra. 2017. *Pengaruh Penambahan Pelumas Pada Pemesinan Frais Dengan Metode Pelumasan Berkuantitas Minimum (MQL) Terhadap Nilai Kekasaran Permukaan Magnesium AZ31*. Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia.
- Sulaiman, Syaidatul A. 2012. *Influence of Magnetic Field on Reduction Chatter and of Surface Roughness in End Milling of Titanium Alloy - Ti-6Al-4V*. Departement of Manufacturing and Materials Engineering, International Islamic Univesity of Malaysia.
- Uriarte L et al. 2007. *Error budget and stiffness chain assessment in a micromilling machine equipped with tools less than 0.3mm in diameter*. Fundaci'on Tekniker, Avda. Otaola 20, 20600 Eibar, Spain.
- Vazquez, Elisa et al. 2015 *Analyzing Effects of Cooling and Lubrication Conditions in Micromilling of Ti6Al4V*. Department of Mechanical Engineering and Civil Construction, Universitat de Girona, Av, Girona, Spain.
- Youssef, El-Hofy. 2008. *Machining Technology Machine Tools and Operations*. London : CRC Press.

